

Mika Miettinen

Väsymissärön mallinnus vauriontunnistusta varten

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Kone- ja tuotantotekniikka

Insinöörityö

29.1.2016

Tekijä Otsikko	Mika Miettinen Väsymissärön mallinnus vaurion tunnistusta varten
Sivumäärä Aika	54 sivua + 2 liitettä 29.1.2016
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Kone- ja tuotantotekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Tuotesuunnittelu
Ohjaaja	Yliopettaja Jyrki Kullaa
<p>Tämän insinööriyön tavoitteena oli väsymissärön mallinnuksella luoda vaurion tunnistusta varten simuloitua anturidataa sekä ehjästä että vaurioituneesta rakenteesta. Tutkittavana rakenteena oli ulokepalkki pyöreällä putkiprofiililla ja vauriotyyppinä väsymissärö, joka on tyypiltään niin sanottu hengittävä särö. Vaurio mallinnettiin myös avoimena särönä tulosten vertailun vuoksi. Simuloinnin tulosten perusteella selvitettiin pienin vaurion tunnistuksessa havaittavan särön koko. Simulointiin käytettiin elementtimenetelmään perustuvaa Abaqus FEA -ohjelmistoa.</p> <p>Simuloitavista malleista mitattiin rakenteen ylä- ja alapinnoilta valituista mittaussolmuista vaurion tunnistusta varten kiihtyvyydet ja venymät, kun rakenteen vapaassa päässä vaikutti satunnaisheräte. Molemmilla särötyypeillä simuloitiin kaksi ehjää ja neljä vaurioitunutta rakennetta. Vaurioituneissa rakenteissa särökoot olivat 50 %, 25 %, 13,5 % ja 7,7 % profiilin pinta-alasta. Särön sijainti malleissa oli 10 mm:n etäisyydellä rakenteen juuresta.</p> <p>Hengittävän särön osalta pystyttiin havaitsemaan sekä kiihtyvyyksien että venymien perusteella kaikki mallinnetut säröt niin rakenteen ala- kuin yläpinnan mittaussolmujen perusteella.</p> <p>Avoimen särön osalta havaittiin yläpinnan venymien perusteella kaikki säröt, mutta kun analyysistä jätettiin pois lähimpänä säröä oleva mittaussolmu, ei enää havaittu minkään kokoisia säröjä. Sekä yläpinnan kiihtyvyyksien että alapinnan venymien perusteella havaittiin kuitenkin suurin ja toiseksi suurin avoin särö (50 % ja 25 %).</p> <p>Insinööriyön tuloksena saatiin toimivat mallit valitun ulokepalkkirakenteen simuloimiseen sekä havaittiin työn kannalta merkitykselliset vauriot.</p> <p>Malleissa on vielä simuloinnin realistisuuden kannalta parannettavaa. Esimerkiksi vaimennuksella, jota ei käytetyissä malleissa ollut, on todennäköisesti vaikutusta rakenteen käyttäytymiseen vaurion tunnistuksen kannalta merkittävällä tavalla. Myös säröpintojen kontaktin parantaminen vaatii jatkoselvitystä.</p>	
Avainsanat	Rakenteiden kunnonvalvonta, vaurion tunnistus, väsymissärö, mallintaminen, elementtimenetelmä, Abaqus

Author Title	Mika Miettinen Fatigue Crack Modeling for Damage Detection
Number of Pages Date	54 pages + 2 appendices 29 January 2016
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Mechanical Engineering
Specialisation option	Product Design
Instructor	Jyrki Kullaa, Principal Lecturer
<p>The objective of this Bachelor's thesis was to create simulated sensor data from damaged and undamaged structures for fatigue crack detection. The studied structure was a cantilever beam with a hollow circular cross-section and the type of the damage analyzed was a fatigue crack. A fatigue crack is the so-called breathing crack. The studied structure was also modeled using open cracks for the comparison of results between breathing cracks and open cracks. Based on the results of the simulations, the smallest detectable crack size was studied. Simulations were carried out using Abaqus FEA software.</p> <p>Accelerations and strains were extracted from the selected measurement nodes at the bottom and at the top of the geometry while random excitation was applied at the free end of the beam. Two undamaged and four damaged structures were simulated using both crack types. In the damaged structures, the crack sizes were 50 %, 25 %, 13.5 % and 7.7 % of the surface area of the profile. The location of the crack was 10 mm from the fixed end of the beam.</p> <p>In case of breathing cracks, all modeled cracks were detected successfully based on both accelerations and strains on the basis of the extracted data from both top and bottom measurement nodes.</p> <p>In case of open cracks, all modeled open cracks were detected based on the strains of the top surface. On the other hand, if a measurement node closest to the crack is eliminated from the analysis, no cracks were detected. However, based on both accelerations on the top surface and strains on the bottom surface of the structure, the largest and the second largest crack was detected (50 % & 25 %).</p> <p>As a result of this thesis, functional FEM-models of the studied cantilever beam structure were made and the most significant damages were detected.</p> <p>In conclusion, it was discovered that further research is necessary to improve the used models to obtain more realistic simulations and results. For example, the current models do not include damping, which will probably affect the behavior of the structure from the point of view of damage detection as well. Also, the contact modeling of the fatigue crack should be improved for more realistic contact interaction and results.</p>	
Keywords	Structural Health Monitoring, Damage detection, Fatigue crack, Modeling, Finite Element Method, Abaqus

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Rakenteiden kunnonvalvonta	2
2.1	Yleistä rakenteiden kunnonvalvonnasta	2
2.2	Vaurion määrittely	3
2.3	Vaurion tunnistaminen	4
2.4	Anturit	6
3	Abaqus	6
3.1	Abaqus Explicit/Implicit	6
3.1.1	Dynaamiset epälineaariset analyysit	6
3.1.2	Suorat aikaintegrointimenetelmät	7
3.1.3	Vaadittava aikainkremetti	8
3.1.4	Energiatasapaino	12
3.2	Sidosyhtälöt (<i>Tie Constraint</i>)	12
3.3	Kontakti (<i>General Contact</i>)	13
4	Analysoitava rakenne ja rakenteen mallintaminen	14
4.1	Rakenteen valinta	14
4.2	Rakenteen ja särön mallintaminen	15
5	Elementtiverkko ja mallin validointi	19
5.1	Elementtiverkko	19
5.1.1	Testattavat elementtiverkot	19
5.1.2	Testattavat elementtityypit	20
5.2	Testaus ja mallin validointi	22
5.2.1	Ominaistaajuuksien vertailu	22
5.2.2	Taipuma rakenteen vapaassa päässä	25
5.2.3	Taipumat koko rakenteen matkalla	30
5.3	Elementtityypin ja elementtiverkon valinta	33
6	Simulointi	36
6.1	Simuloitavat mallit	36
6.2	Vaadittava aikainkrementti	38

6.3	Tulostettavat suureet	40
7	Tulokset	42
7.1	Simuloinnin tulokset	42
7.2	Vaurion tunnistuksen tulokset	46
8	Yhteenveto	51
	Lähteet	53
	Liitteet	
	Liite 1. Abaqus/Explicit: Mallin energiakomponentit	
	Liite 2. Työohje - Simuloitavan rakenteen mallinnus ja simulointi (Abaqus/Explicit)	

1 Johdanto

Monet nykyäänkin käytössä olevat rakennus- ja konetekniikan rakenteet ovat lähestymässä niille suunniteltua kestoikää tai ovat jo ylittäneet sen. Johtuen usein taloudellisista syistä, monet näistä rakenteista ovat ikääntymisestä huolimatta edelleen käytössä. Rakenteiden kunnonvalvonta (SHM - Structural Health Monitoring) ja siihen liittyvä vaurion-tunnistus mahdollistaisivat muun muassa näiden ikääntyvien rakenteiden käyttöön turvallisen jatkamisen. [1, s. 305.]

Rakenteiden kunnonvalvonnalla tarkoitetaan menetelmää, jolla seurataan käytössä olevan rakenteen kuntoa esimerkiksi hyödyntämällä antureita ja niiltä kerättävää dataa. Reaaliaikaisesti tapahtuva rakenteiden kunnonvalvonta mahdollistaisi monien aikatauluihin perustuvien tarkastus- ja huoltotoimenpiteiden muuttamisen enemmän rakenteen kuntoon perustuvaksi. Sovelluskohteita rakenteiden kunnonvalvonnalle löytyy muun muassa rakennus-, avaruus- ja lentotekniikasta. [1, s. 303–305.]

Yleinen vauriomekanismi konetekniikan sovelluksissa on väsyminen. Väsymissärön tutkiminen kokeellisesti on kuitenkin haastavaa, sillä väsytykskoekiden suorittaminen saattaa vaatia pitkiäkin aikoja. Rakenteille, joilla on erittäin suuri väsymisluku, väsytykskoekiden suorittaminen voi viedä jopa viikkoja. [2, s. 734.] Tästä johtuen väsytykskoekiden korvaaminen simuloinneilla on varteenotettava vaihtoehto tutkittaessa väsymissärön vaikutusta rakenteen käyttäytymiseen.

Tämän insinööriyön tavoitteena on väsymissärön mallinnuksella luoda simuloitua anturidataa sekä ehjästä että vaurioituneesta rakenteesta rakenteiden kunnonvalvonnan vaurion-tunnistuksen testaamiseen. Tutkittavassa rakenteessa vauriona on tyypillinen väsymisestä aiheutuva hengittävä särö, ja tarkoituksena on selvittää, minkä kokoinen särö pystytään vaurion-tunnistuksessa havaitsemaan. Tutkittava rakenne on ulokepalkki pyöreällä putkiprofiililla, jossa särö sijaitsee lähellä rakenteen jäykkää kiinnitystä. Tällaisen vauriotyyppin tutkimiseen simulointi on hyvä työkalu, sillä väsymissärön luominen todelliseen rakenteeseen on haastavaa. Simuloinnit suoritettiin käyttämällä Abaqus FEA -ohjelmiston Abaqus/Explicit-ratkaisijaa tutkittavan ilmiön epälineaarisuuden vuoksi.

Insinööriyön teoriaosassa käydään läpi yleisellä tasolla rakenteiden kunnonvalvontaa, sekä perehdytään vaurion määrittelyyn ja vaurion tunnistukseen prosessina. Lisäksi selvitetään Abaquksen tässä työssä tarvittavia ominaisuuksia, kuten esimerkiksi Abaqus/Explicit-ratkaisijaa, sidosyhtälöitä ja kontaktien luontia. Tarkemmin Abaqus/Explicitin osalta selvitetään suorien aikaintegrointimenetelmien teoriaa ja yhtälönratkaisua sekä muita simulointiin vaikuttavia tekijöitä, esimerkiksi vaadittavan aikainkrementin määrittelyä.

Insinööriyön soveltavassa osassa aluksi selvitetään analysoitavan rakenteen valinta ja mallintaminen sekä särön mallinnus. Lisäksi perehdytään elementtityypin ja elementti-verkon valintaan sekä mallin testaukseen ja vahvistamiseen. Lopuksi kuvataan simulointi ja saadut tulokset.

2 Rakenteiden kunnonvalvonta

2.1 Yleistä rakenteiden kunnonvalvonnasta

Rakenteiden kunnonvalvonnalla (SHM) tarkoitetaan menetelmää, jolla pyritään havaitsemaan rakenteen vaurio ja mahdollisesti myös tunnistamaan vaurion ominaisuuksia. Sovelluskohteita löytyy muun muassa rakennus-, avaruus- ja lentotekniikasta sekä muilta konetekniikan osa-alueilta. Menetelmään kuuluu rakenteen tai mekaanisen järjestelmän havainnointi esimerkiksi aikatasossa, vaurioille alttiiden ominaisuuksien tai piirteiden tunnistaminen sekä näiden ominaisuuksien mittaaminen. Näitä mittaustuloksia analysoimalla pyritään selvittämään rakenteen tai mekaanisen järjestelmän sen hetkinen kunto. [1, s. 303–304.]

Rakenteiden ja mekaanisten järjestelmien vaurioiden tunnistaminen voidaan jakaa neljään toisistaan poikkeavaan menetelmään, joilla on kuitenkin sama tavoite, vaurion tunnistaminen [3, s. 86]:

- Rakenteiden kunnonvalvonta (SHM - Structural Health Monitoring)
- Pyörivien koneiden kunnonvalvonta (CM - Condition Monitoring)
- Ainetta rikkomattomat menetelmät (NDE - Non-Destructive Evaluation)
- Tilastollinen prosessinohjaus (SPC - Statistical Process Control)

Rakenteiden kunnonvalvonnalla (SHM) viitataan yleisesti reaaliaikaiseen rakenteelliseen vaurion tunnistukseen kiinteissä rakenteissa, esimerkiksi rakennuksissa tai lentokoneissa, kun taas pyörivien koneiden kunnonvalvonnassa (CM) pyritään tunnistamaan vaurio tai seuraamaan laitteen kuntoa pyörivissä koneissa [1, s. 304]. Ainetta rikkomatomia menetelmiä (NDE) käytetään yleensä jo havaitun ja paikallistetun vaurion lähempään tarkasteluun. Yleisimpiä NDE-menetelmiä ovat mm. ultraäänitarkastus, lämpökameramittaus ja shearografia. [3, s. 86.] Tilastollinen prosessinohjaus (SPC) erottuu edellä mainituista siinä, että sillä pyritään havaitsemaan muutoksia prosessissa, esimerkiksi tuotteen laatupoikkeamia, jotka sitten mahdollisesti indikoivat viasta tai vauriosta järjestelmässä [1, s. 304–305].

2.2 Vaurion määrittely

Vaurio voidaan yleisellä tasolla määritellä tarkoittamaan sellaista rakenteen muutosta jolla on nykyisen tai tulevan toimintakyvyn kannalta haitallisia vaikutuksia. Nämä muutokset voivat olla esimerkiksi muutoksia materiaalin ominaisuuksissa tai rakenteen geometriassa [1, s. 303].

Lähtökohtaisesti kaikissa materiaaleissa on nano- ja mikrotasolla jonkin verran virheitä, kuten epäpuhtauksia, hilavirheitä, esimerkiksi vakansseja (pistemäinen hilavirhe), sulkeumia ja mikrosäröjä [1, s. 304; 4, s. 1641]. Nämä rakenteelliset virheet (*defects*) voivat sopivan kuormituksen vaikutuksesta kasvaa ja yhdistyä aiheuttaen vaurioita rakenteeseen [1, s. 304]. Yleisin syy vaurion syntymiseen on rakenteen altistuminen dynaamiselle kuormitukselle, mikä johtaa mikrosäröjen kasvamiseen ja sen seurauksena materiaalin ominaisuuksien muuttumiseen [3, s. 87]. Hilavirheet voivat myös ydintyä ja kehittyä mikrosäröiksi ja jopa makrosäröiksi asti [5, s. 345]. Muita mahdollisia vauriomekanismeja ovat muun muassa korroosio, viruminen sekä rakenteiden ylikuormitus [3, s. 87].

Vaurio ei välttämättä vaikuta rakenteen toimintaan tai sen kestävyYTEEN. Rakenteen tilan kehitys voidaan jakaa kolmeen askeleeseen, joista kukin johtaa seuraavaan [3, s. 87]:

- Nano- ja mikrotason virheet (*defects*) ovat todellisille materiaaleille luontaisia ominaisuuksia, jotka eivät vaikuta suunnitellun rakenteen tai systeemin toimintaan.
- Vaurio (*damage*) on nano- ja mikrotason virheistä kehittynyt vaurio, esimerkiksi makrosärö, mikä vaikuttaa rakenteen toimintaan, mutta mahdollistaa kuitenkin riittävän toimintakyvyn.
- Vikaantuminen (*fault*) on tilanne, jossa vaurio on kehittynyt pisteeseen, jossa rakenteen toimintakyky on heikentynyt tasolle, jota ei voida hyväksyä.

Hyödyntämällä tätä ajatusmallia voidaan rakenteista suunnitella vaurioita sietäviä (*damage tolerant*) sen sijaan, että ne suunniteltaisiin kestämaan vaurioitumattomina koko elinkaaren ajan (*safe life*) [3, s. 87]. Vaurioita sietävien rakenteiden hyödyntäminen edellyttää vaurioiden seurantarjestelmän käyttöä, koska vaurion syntyminen on odotettavissa rakenteen elinkaaren aikana. Nykyään tällaiset rakenteet, esimerkiksi lentokoneissa, tarkastetaan säännöllisin väliajoin. *SHM* mahdollistaisi älykkäänä kunnonvalvontamenetelmänä useiden tällaisten aikatauluihin tai käyttötunteihin perustuvien tarkastus- ja korjaustoimenpiteiden muuttamisen enemmän rakenteen tai järjestelmän kuntoon perustuvaksi.

2.3 Vaurion tunnistaminen

Vaurion tunnistamista varten täytyy pystyä keräämään sopivaa dataa, jonka perusteella vaurion tunnistus voidaan suorittaa. Tämä vaatii tarkoitukseen soveltuvien mittalaitteiden käyttöä ja tietoa siitä, millaisia vaikutuksia mahdollisella vauriolla on mitattuun dataan. Tästä päästään vauriotunnistuksen yhteen perusongelmista: mikään sensori, anturi tai mittalaite ei voi mitata suoraan rakenteen vauriota, vaan sensorilla täytyy aina mitata jotain suuretta, joka on yhteydessä mahdolliseen vauriotyyppiin, kuten esimerkiksi venymää [4, s. 1651]. Vaurion tunnistus vaatii vertailudataa (*training set*) vähintään ehjästä rakenteesta normaalissa käyttöympäristössä, mutta jotta rakenteen vaurio pystyttäisiin määrittämään tarkemmin, täytyy vertailudataa olla myös erilaisista vauriotiloista [4, s. 1642–1643].

Vaurion tunnistaminen prosessina voidaan jakaa viiteen tasoon, joissa kukin taso vaatii tiedot edeltäviltä tasoilta [1, s. 311; 3, s. 88–89].

- **Havaitseminen** antaa indikaation mahdollisesta vauriosta rakenteessa.
- **Paikallistaminen** antaa tiedon vaurion sijainnista.
- **Luokittelu** antaa tiedon vaurion tyypistä.
- **Arviointi** antaa tiedon vaurion laajuudesta.
- **Ennuste** antaa tiedon jäljellä olevasta käyttöiästä.

Monet vaurion tunnistusmenetelmät perustuvat hahmontunnistukseen (PR - *Pattern Recognition*), jossa tarkoitukseen sopiva hahmontunnistusalgoritmi vertaa sensoreilta tulevaa dataa olemassa olevaan vertailudataan [3, s. 89] ja antaa tiedon rakenteen tilasta. Hahmontunnistusmenetelmät rakenteiden kunnonvalvonnassa voidaan jakaa ohjattuun ja ohjaamattomaan oppimiseen.

Ohjaamattomassa oppimisessä vertailudatan ei tarvitse sisältää tietoa vaurioituneesta rakenteesta. Pääasiassa tällaiset ohjaamattoman oppimisen menetelmät perustuvat poikkeamien tunnistamiseen (*novelty, outlier detection*) [1, s. 311], jossa diagnostiikan muodostamiseen tarvitaan vain vertailudataa ehjän systeemin tai rakenteen toiminnasta normaalissa toimintaympäristössä. Rakenteen tai systeemin antureilta tulevaa dataa verrataan käytön aikana alkuperäiseen vertailudataan ja mikäli merkittäviä poikkeamia havaitaan, antaa algoritmi indikaation siitä [3, s. 90]. Menetelmä kuitenkin sopii vain vaurion *havaitsemiseen*, eikä sen perusteella pystytä suorittamaan korkeamman tason vaurion tunnistusta.

Ohjatulla oppimisella tarkoitetaan menetelmää, jossa vertailudataa on ehjän rakenteen lisäksi myös vaurioituneesta rakenteesta [1, s. 311]. Tämä lisää kuitenkin vaatimuksia vaurion tunnistusjärjestelmälle. Jotta menetelmä toimisi halutulla tavalla, täytyy vertailudataa olla olemassa myös kaikista mahdollisista vauriotilanteista. Tämä data voidaan luoda joko laskemalla, mallintamalla tai kokeellisilla menetelmillä. Kaikissa edellä mainituissa on omat ongelmansa. Monimutkaisten rakenteiden mallintaminen esimerkiksi käyttämällä elementtimenetelmään perustuvaa analyysiä voi olla todella aikaa vievää ja

myös itse vaurion mallintaminen saattaa olla vaikeaa. Myös vertailudatan kerääminen kokeellisilla menetelmillä tuo omat haasteensa. Tarpeeksi kattavan vertailudatan kerääminen vaatii useita kopioita halutusta rakenteesta ja niiden vaurioittamista kaikilla mahdollisilla tavoilla, jotka saattavat ilmetä rakenteen normaalissa käytössä. Luonnollisesti tämä ei ole mahdollista arvokkaille rakenteille, kuten esimerkiksi lentokoneille. [3, s. 89.]

2.4 Anturit

Antureiden tehtävänä on kerätä rakenteesta tai järjestelmästä vauriontunnistuksen kannalta merkityksellistä dataa. Rakenteiden kunnonvalvonnan kannalta on suuri merkitys sillä, millaisia antureita käytetään ja miten ne on sijoiteltu.

Jotta valinta käytettävistä antureista ja niiden sijoittelusta voidaan tehdä, tarvitaan tietoa oletetuista vauriotyypeistä ja niiden sijainneista. Suunnittelussa tulee huomioida myös se, tarvitaanko laajaa koko rakenteeseen ulottuvaa valvontajärjestelmää, vai riittääkö tiettyyn kriittiseen alueeseen tai komponenttiin kohdistuva paikallinen valvontajärjestelmä. Myös näiden kahden yhdistelmä saattaa olla mahdollinen vaihtoehto, jossa koko rakennetta seurataan esimerkiksi värähtelyyn perustuvilla menetelmillä, mutta jotain kriittistä aluetta tarkastellaan erikseen, esimerkiksi tarkemmalla ultraääneen perustuvalla menetelmällä. [3, s. 91.]

3 Abaqus

3.1 Abaqus Explicit/Implicit

3.1.1 Dynaamiset epälineaariset analyysit

Abaqus Explicit (Abaqus/Explicit) ja Abaqus Implicit (Abaqus/Standard) ovat suoria aikaintegrointimenetelmiä, jotka sopivat erityisesti epälineaaristen dynaamisten ilmiöiden simuloimiseen [6, 6.3.1]. Rakenteen epälineaarisuus voi johtua esimerkiksi epälineaarisesta materiaalista, reunaehdosta tai geometriasta. Materiaalista johtuvana epälineaarisuutena mainittakoon esimerkkinä metallin myötäminen. [7, 8.1.] Reunaehdoista syntyvä epälineaarisuus voi johtua esimerkiksi kontaktista, kuten tässä työssä hengittävästä säröstä, joka muuttaa rakenteen ominaisuuksia riippuen siitä, onko särö aukeamassa vai

sulkeutumassa. Geometrinen epälineaarisuus esiintyy esimerkiksi rakenteissa, joissa ilmenee suuria siirtymiä tai rotaatioita.

3.1.2 Suorat aikaintegrointimenetelmät

Suoraan aikaintegrointiin perustuvissa menetelmissä lähestymistapana on liikeyhtälöiden ratkaiseminen tietyllä ajanhetkellä $n+1$ (yhtälö 1).

$$[M]\{\ddot{D}\}_n + [C]\{\dot{D}\}_n + [K]\{D\}_n = \{R_{ext}\}_n \quad (1)$$

jossa n on ajanhetki $n\Delta t$, Δt on aikainkrementin koko, $\{D\}$ on siirtymävektori, $\{R_{ext}\}$ on ulkoisten voimien voimavektori ja $[M]$, $[C]$ ja $[K]$ ovat massa-, vaimennus- ja jäykkyysmatriisit. $\{\dot{D}\}$ ja $\{\ddot{D}\}$ ovat siirtymien aikaderivaatat.

Lineaarisille tapauksille massa-, vaimennus- ja jäykkyysmatriisit ovat vakioita, mutta epälineaariselle materiaalille jäykkyysmatriisi $[K]$ on siirtymien funktio. Koska siirtymät esitetään ajan funktiona $\{D\}_n$, ja siten myös jäykkyysmatriisi $[K]$ on epälineaarisissa tapauksissa ajasta riippuvainen, voidaan yhtälö 1 esittää muodossa

$$[M]\{\ddot{D}\}_n + [C]\{\dot{D}\}_n + \{R_{int}\}_n = \{R_{ext}\}_n \quad (2)$$

jossa $\{R_{int}\}_n$ on materiaalin muodonmuutoksesta johtuvien sisäisten voimien vektori ajanhetkellä $n\Delta t$.

Suorat aikaintegrointimenetelmät voidaan jakaa eksplisiitteihin ja implisiitteihin menetelmiin. Eksplisiiteillä menetelmillä, kuten Abaqus/Explicit, yhtälöt ovat muotoa

$$\{D\}_{n+1} = f\left(\{D\}_n, \{\dot{D}\}_n, \{\ddot{D}\}_n, \{D\}_{n-1}, \dots\right) \quad (3)$$

Implisiiteillä menetelmillä, kuten Abaqus/Standard Implicit, yhtälöt ovat muotoa

$$\{D\}_{n+1} = f\left(\{\dot{D}\}_{n+1}, \{\ddot{D}\}_{n+1}, \{D\}_n, \dots\right) \quad (4)$$

Eksplisiiteissä menetelmissä $\{D\}_{n+1}$ on määritelty aiempien aikainkrementtien siirtymien $\{D\}$ ja siirtymien aikaderivaattojen $\{\dot{D}\}$ ja $\{\ddot{D}\}$ perusteella, joten yhtälöiden ratkaiseminen on yksinkertaista. Implisiiteissä menetelmissä siirtymien $\{D\}_{n+1}$ ratkaiseminen vaatii myös siirtymien aikaderivaatat $\{\dot{D}\}_{n+1}$ ja $\{\ddot{D}\}_{n+1}$, jotka ovat tuntemattomia.

Eksplisiiteille menetelmille yleinen tapa ratkaista liikeyhtälöitä on keskeisdifferenssimenetelmä, jossa nopeudet $\{\dot{D}\}_n$ ja kiihtyvyydet $\{\ddot{D}\}_n$ arvioidaan ajanhetkellä $n\Delta t$ keskeisdifferenssin avulla

$$\{\dot{D}\}_n = \frac{1}{2\Delta t} (\{D\}_{n+1} - \{D\}_{n-1}) \text{ ja} \quad (5)$$

$$\{\ddot{D}\}_n = \frac{1}{\Delta t^2} (\{D\}_{n+1} - 2\{D\}_n + \{D\}_{n-1}). \quad (6)$$

Yhdistämällä yhtälöt (5) ja (6) yhtälön (1) kanssa, saadaan yhtälö

$$\begin{aligned} \left[\frac{1}{\Delta t^2} M + \frac{1}{2\Delta t} C \right] \{D\}_{n+1} \\ = \{R_{ext}\}_n - [K]\{D\}_n + \frac{1}{\Delta t^2} [M](2\{D\}_n - \{D\}_{n-1}) + \frac{1}{2\Delta t} [C]\{D\}_{n-1} \end{aligned} \quad (7)$$

josta saadaan ratkaistua siirtymät $\{D\}_{n+1}$.

Mikäli matriisit $[M]$ ja $[C]$ ovat diagonaalimatriiseja, onnistuu $\{D\}_{n+1}$ ratkaiseminen ilman useamman yhtälön yhtäaikaista ratkaisua. Epälineaarisille malleille jäykkyyismatriisi $[K]$ ei ole vakio, joten $\{D\}_{n+1}$ ratkaiseminen vaatii sisäisten voimien vektorin $\{R_{int}\}_n$. Kun tiedetään siirtymät $\{D\}_n$ ajanhetkellä $n\Delta t$, tiedetään myös venymät samalla ajanhetkellä ja näin ollen sisäisten voimien vektori $\{R_{int}\}_n$ saadaan laskettua. [8, s. 395–398.]

3.1.3 Vaadittava aikainkrementti

Simulaation stabiiliteetti Abaqus/Explicitissä vaatii riittävän pienen aikainkrementin käyttämistä laskennassa. Liian suuren aikainkrementin käyttäminen aiheuttaa mallin epästabiiliutta ja tulosten vääristymistä. Laskentaan vaadittava aika on suoraan verrannollinen käytettävän aikainkrementin pituuteen, joten on suotavaa käyttää mahdollisimman lähellä stabiiliteettirajaa olevaa aikainkrementtiä. [7, 9.3.]

Mallin stabiileettiraja määritetään rakenteen korkeimman taajuuden mukaan siten, että stabiili aikainkrementti ilman vaimennusta on

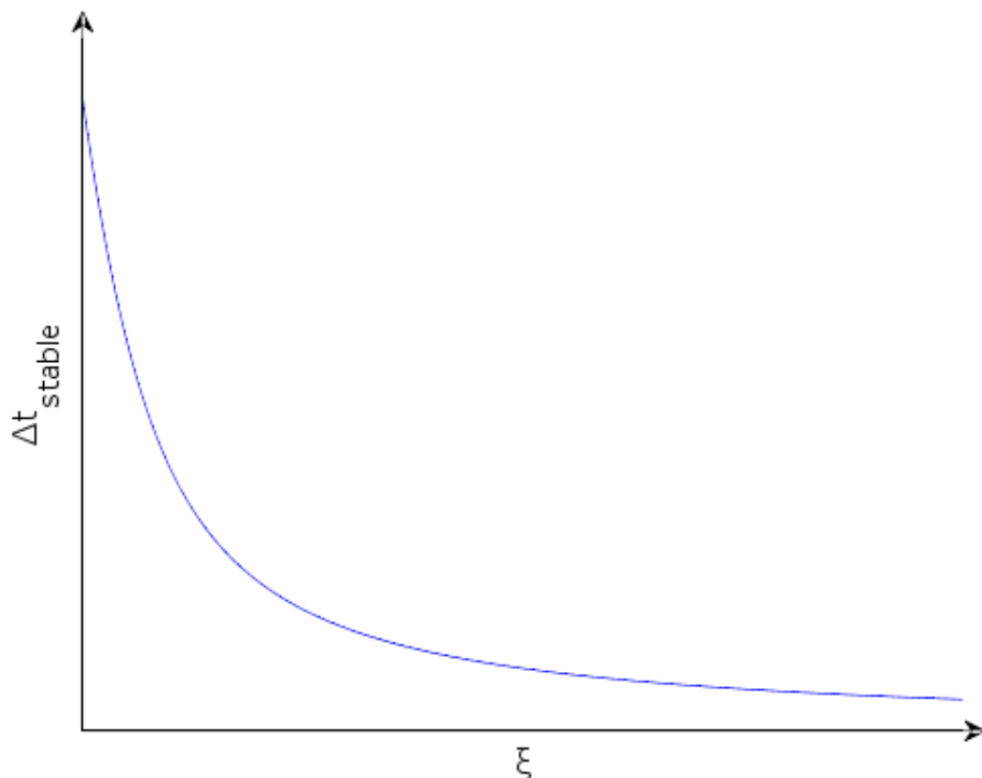
$$\Delta t_{stable} \leq \frac{2}{\omega_{max}} \quad (8)$$

ja vaimennuksen kanssa

$$\Delta t_{stable} \leq \frac{2}{\omega_{max}} (\sqrt{1 + \xi^2} - \xi), \quad (9)$$

joissa Δt_{stable} on stabiili aikainkrementti, ω_{max} on suurin taajuus rakenteessa ja ξ korkeimman muodon vaimennussuhde.

Kuvassa 1 on esitetty vaimennussuhteen ξ vaikutus stabiilin aikainkrementin kokoon Δt_{stable} .



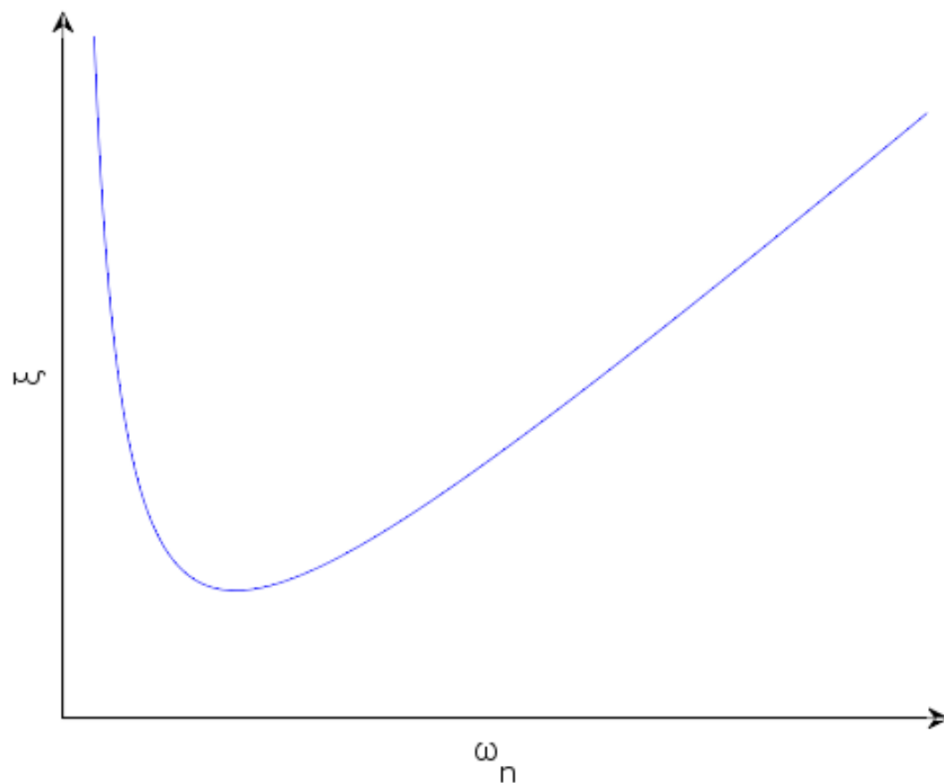
Kuva 1. Vaimennussuhteen ξ vaikutus stabiiliin aikainkrementtiin Δt_{stable} .

Vaimennussuhde ξ voidaan esittää yhtälöllä

$$\xi = \frac{\alpha}{2\omega_{max}} + \frac{\beta \omega_{max}}{2} \quad (10)$$

jossa α on materiaalin massasta riippuva verrannollisuuskerroin ja β materiaalin jäykkyydestä riippuva verrannollisuuskerroin.

Yhtälöstä 10 nähdään, että suurilla ominaistajuuksilla jo pienelläkin verrannollisuuskerroinella β , vaimennussuhde ξ saattaa kasvaa suureksi pienentäen stabiilia aikainkrementtiä merkittävästi. Verrannollisuuskerroimen α vaikutus korostuu taas, mikäli suurin ominaistajuus on pieni, mutta suurilla ominaistajuuksilla vaikutus on mitätön. Kuvassa 2 on esitetty ominaistajuuden ω_n vaikutus vaimennussuhteeseen ξ . [6, 26.1.1.]



Kuva 2. Ominaistajuuden ω_n vaikutus vaimennussuhteeseen ξ .

Koska rakenteessa esiintyvien korkeimpien taajuuksien laskeminen tarkasti ei ole mahdollista, käytetään stabiilin aikainkrementin arvioimiseen menetelmää, joka perustuu elementin kokoon ja aallon etenemisnopeuteen rakenteessa. Arvio vaadittavasta aikainkrementin pituudesta saadaan yhtälöistä

$$\Delta t_{stable} \approx \frac{L_{min}}{c_d} \quad (11)$$

ja

$$c_d = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (12)$$

jossa L_{min} on pienin elementin dimensio mallissa, c_d on aallon etenemisnopeus rakenteessa, E on materiaalin kimmokerroin ja ρ materiaalin tiheys.

Yhtälö (12) aallon etenemisnopeudelle pätee materiaalille, jonka suppeumakerroin on 0. Tarkempaan arvioon vaadittavan aikainkrementin pituudesta voidaan käyttää aallonnopeuden määritelmää

$$c_d = \sqrt{\frac{\hat{\lambda} + 2\hat{\mu}}{\rho}} \quad (13)$$

jossa ovat mukana Lamén vakiot $\hat{\lambda}$ ja $\hat{\mu}$. Lamén vakiot isotrooppiselle ja elastiselle materiaalille ovat

$$\hat{\lambda} = \lambda_0 = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (14)$$

ja

$$\hat{\mu} = \mu_0 = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (15)$$

jossa E on materiaalin kimmokerroin ja ν suppeumakerroin.

Vaadittavaan aikainkrementin pituuteen vaikuttavat siis materiaalin ominaisuudet sekä elementtiverkon pienimmän elementin koko. Simuloinnissa on hyvä huomioida, että staabiiliin aikainkrementin koko voi muuttua myös simuloinnin aikana, esimerkiksi elementtien muodonmuutoksen vaikutuksesta.

3.1.4 Energiatasapaino

Eri energiakomponenttien vertailu on hyvä menetelmä mallin stabiilisuuden ja toimivuuden tarkasteluun Abaqus/Explicitissä. Esimerkiksi liian pitkä aikainkrementti aiheuttaa epästabiiliutta mallissa, mikä saattaa näkyä huomattavina muutoksina mallin energiakomponenteissa. [7, 9.3.]

Koko mallin energiatasapaino voidaan ilmaista yhtälöllä [7, 9.6]

$$E_I + E_V + E_{FD} + E_{KE} + E_{IHE} - E_W - E_{PW} - E_{CW} - E_{MW} - E_{HF} = E_{total} = Vakio \quad (16)$$

jossa

$$E_I = E_E + E_P + E_{CD} + E_A + E_{DMD} + E_{DC} + E_{FC} \quad (17)$$

E_I on sisäinen energia
 E_V on vaimennuksen viskoosienergia
 E_{FD} on kitkaenergia
 E_{KE} on kineettinen energia
 E_W on ulkoisten voimien tekemä työ
 E_{PW} on kontaktienergia
 E_E on elastinen venymäenergia.
 E_{total} on energioiden summa.

Tässä on lueteltu vain tämän insinööriyön kannalta tärkeimmät energiakomponentit. Loput energiakomponentit löytyvät selityksineen liitteestä 1.

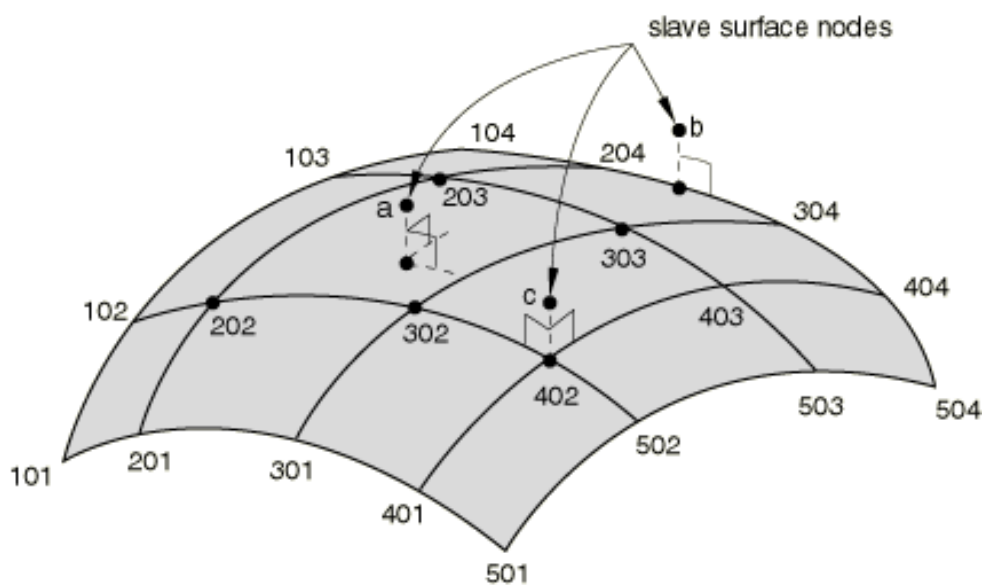
Dynaamisissa Abaqus/Explicit-analyysseissä energioiden vertailu on tärkeä osa tulosten tarkkuuden selvittämisessä. Mallin energioiden summan E_{total} tulisi olla vakio tai lähes vakio koko simuloinnin ajan. Joissakin tapauksissa malliin saattaa muodostua "keinotekoisia" energioita, jotka syntyvät esimerkiksi vaimennuksesta tai aikainkrementin pidentämisestä käytettäessä *mass-scaling*-ominaisuutta. Näiden energioiden tulisi kuitenkin olla mitättömiä verrattuna todellisiin energioihin, kuten liike-energiaan tai muodonmuutosenergiaan. [6, 6.3.3.]

3.2 Sidosyhtälöt (*Tie Constraint*)

Tie-sidosyhtälö sitoo simuloinnin ajaksi erilliset pinnat toisiinsa siten, että pintojen välillä ei ole suhteellista liikettä. *Tie*-sidosyhtälö mahdollistaa kahden pinnan toisiinsa liittämisen vaikka elementtiverkot pintojen välillä olisivat erilaiset. [9, 15.15.1.] Sidosyhtälössä

määritetään pintapari (*master- ja slave-surface*), joiden välinen liike (rotaatio ja translaatio) sekä aktiiviset vapausasteet asetetaan yhtä suuriksi [6, 35.3.1].

Abaquksessa on valittavissa kaksi eri menetelmää sidosyhtälöiden muodostamiseen, *surface-to-surface* ja *node-to-surface* sidos-formulaatiot. Abaqus/Explicit käyttää oletuksena *node-to-surface* sidos-formulaatiota, jossa sidosyhtälöiden muodostaminen perustuu *master-surface* – *slave-node* -pariin siten, että piste *master-surfacen* pinnalla lähimpänä kutakin *slave-surfacen* solmua lasketaan ja näitä pisteitä käytetään *master-noden* määrittämiseen ja sidosyhtälön muodostamiseen. Kuvasta 3 nähdään, kuinka *node-to-surface* sidos-formulaatio määrittää käytettävät *master-node*:t sidosyhtälöiden muodostamiseen. Esimerkkinä kuvassa 3 *master-surfacen* solmut **202**, **203**, **302** ja **303** muodostavat sidosyhtälön *slave-surfacen* solmulle **a** ja solmut **204** sekä **304** solmulle **b**. [6, 35.3.1.]



Kuva 3. Node-to-surface sidos-formulaatio [6, 35.3.1-5].

3.3 Kontakti (*General Contact*)

Abaqus/Explicitissä kontakti pintojen välille voidaan luoda käyttämällä joko yleistä kontaktialgoritmia (*general contact*) tai kontaktiparialgoritmia (*contact pair*). Yleinen kontaktialgoritmi mahdollistaa automaattisen kontaktipintojen luonnin kaikista mallin osista, kun taas kontaktiparimenetelmässä käyttäjän on itse määritettävä kaikki mahdolliset kontaktiparit. [7, 12.9.]

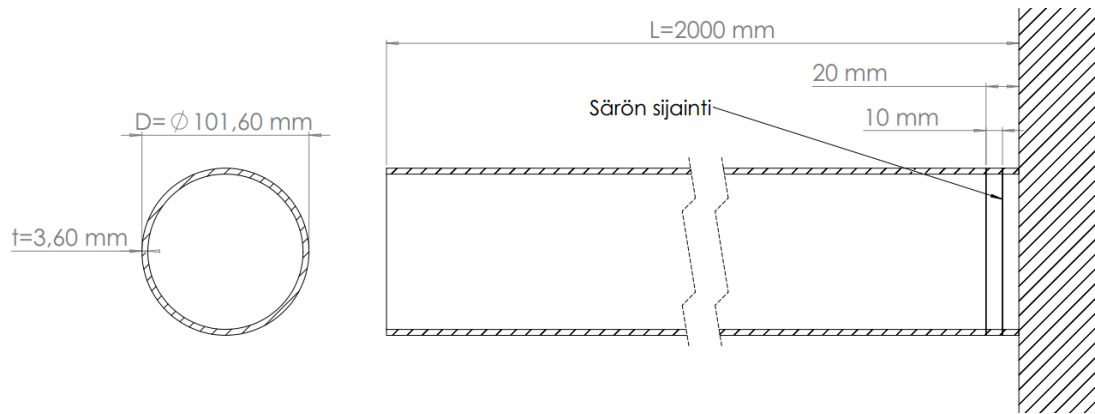
Yleisesti kontakti FEM-mallissa luodaan kovalle kontaktille (*hard contact*) siten, että kontaktipinnoista toisen (*slave surface*) solmut eivät voi läpäistä toista kontaktipintaa (*master surface*). Puhtaassa *master-slave* (*pure master-slave*) -kontaktissa toinen kontaktipinnoista on *master-surface* ja toinen *slave-surface*. Tasapainotetussa *master-slave* (*balanced master-slave*) -kontaktissa Abaqus/Explicit laskee sidosyhtälöt kahdesti siten, että kumpikin kontaktipinnoista toimii sekä *master-surface*na että *slave-surface*na. Näin saatua korjausten painotettua keskiarvoa käytetään kontaktin määrittämiseen. Tasapainotettu *master-slave*-kontakti minimoi kontaktissa olevien kappaleiden tunkeuman parantaen kontaktia, mikä johtaa tarkempiin tuloksiin. [6, 38.2.1.]

4 Analysoitava rakenne ja rakenteen mallintaminen

4.1 Rakenteen valinta

Analysoitavalle ja mallinnettavalle rakenteelle asetettuja vaatimuksia olivat mallin kolmiulotteisuus (3D-solid malli) ja se, että rakenne olisi tyypiltään yleinen konetekniikan sovelluksissa. Analysoitavaksi rakenteeksi valittiin kuvan 4 mukainen ulokepalkkimainen rakenneputki pyöreällä putkiprofiililla, jossa säröt on mallinnettu lähelle rakenteen jäykkää kiinnitystä. Rakenteen juuren lähelle mallinnettu särö vastaa tilannetta, jossa särö on syntynyt väsyttävän taivutuksen vaikutuksesta.

Rakenneputkien käyttö on yleistä esimerkiksi tukirakenteissa, kehikoissa sekä koneiden runkorakenteissa. Ulokepalkkimaisia rakenteita taas esiintyy muun muassa erilaisissa nostolaitteissa.



Kuva 4. Profiilin ja rakenteen dimensiot.

Profiiliksi valittiin Ruukin rakenneputkivalikoimasta [10] ulkohalkaisijaltaan 101,6 mm putkipalkki (S235JRH), jossa seinämänpaksuus on 3,6 mm. Rakenteen ja materiaalin tiedot on esitetty taulukossa 1. Simuloitavissa malleissa ulokepalkin pituus on 2 m.

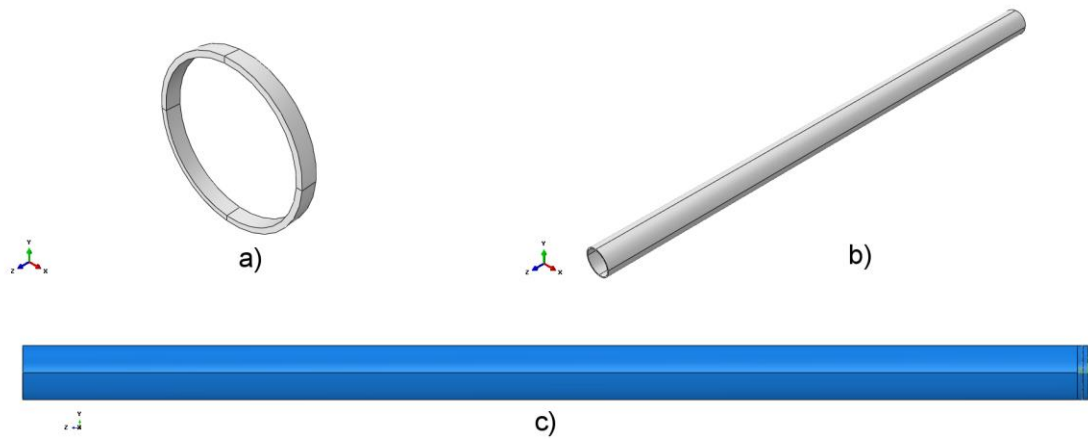
Taulukko 1. Rakenteen ja materiaalin tiedot.

Rakenteen mitat		Materiaalin ominaisuudet	
Ulkohalkaisija (D)	101,6 mm	Kimmokerroin (E)	209 GPa
Seinämänpaksuus (t)	3,6 mm	Suppeumakerroin (ν)	0,30
Pituus (L)	2,0 m	Materiaalitiheys (ρ)	7850 kg/m ³

4.2 Rakenteen ja särön mallintaminen

Rakenteen geometria

Analysoitava rakenne mallinnettiin kolmen osan kokoonpanona (kuva 5). Malli muodostuu kahdesta lyhyestä putkesta (Osa 1 & 2 – á 10 mm), joiden väliin särö mallinnetaan sekä yhdestä pitkästä putkesta (Osa 3 – 1980 mm). Putkiprofiilin ulkohalkaisija on 101,6 mm ja seinämänpaksuus 3,6 mm. Kolmen erillisen osan käyttäminen mallissa mahdollistaa samanlaisen, muuta rakennetta tiheimmän, elementtiverkon käyttämisen särön molemmiin puolin.



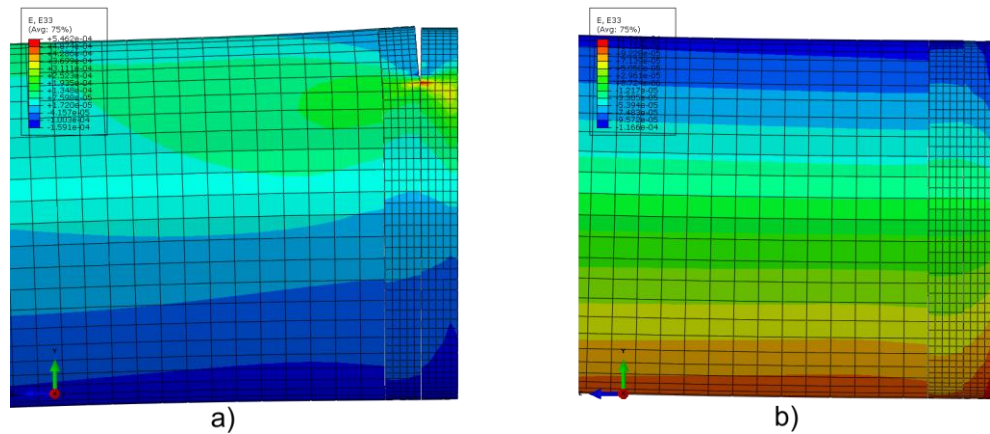
Kuva 5. Analysoitavan rakenteen a) Osat 1 ja 2 (ä 10 mm), b) Osa 3 (1980 mm) sekä c) kokoonpano.

Osat mallinnettiin Abaquksen *part*-moduulilla, yhdistettiin kokoonpanoksi *assembly*-moduulilla ja kiinnitettiin toisiinsa käyttämällä *tie*-sidosformulaatiota.

Särön mallinnus

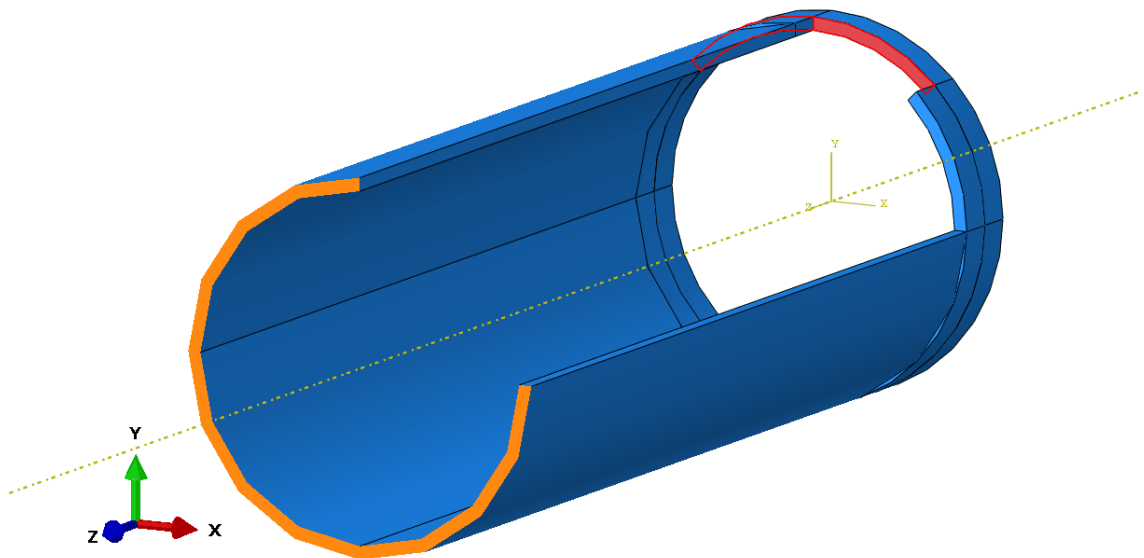
Särö voidaan mallintaa joko avoimena särönä, jossa särön pintojen välillä ei ole voimia siirtävää kontaktia, tai hengittävänä särönä, jossa särön pintojen välillä on kontakti. Avoin särö on simuloinnin kannalta yksinkertaisempi ratkaisu, sillä rakennetta voidaan usein käsitellä lineaarisena. Hengittävä särö käyttäytyy avautuessaan samoin kuin avoin särö, mutta sulkeutuessaan siirtää myös normaalivoimia särön pintojen välillä (kuva 6).

Hengittävä särö on realistisempi, mutta tekee mallista epälineaarisen ja näin myös huomattavasti vaikeammin analysoitavan. Vaikka varsinainen pääpaino tässä insinöörityössä oli hengittävän särön mallintamisella, mallinnettiin rakenne myös avoimella säröllä.



Kuva 6. Hengittävä särö a) avautuessa ja b) sulkeutuessa (kuvassa 25 % särö).

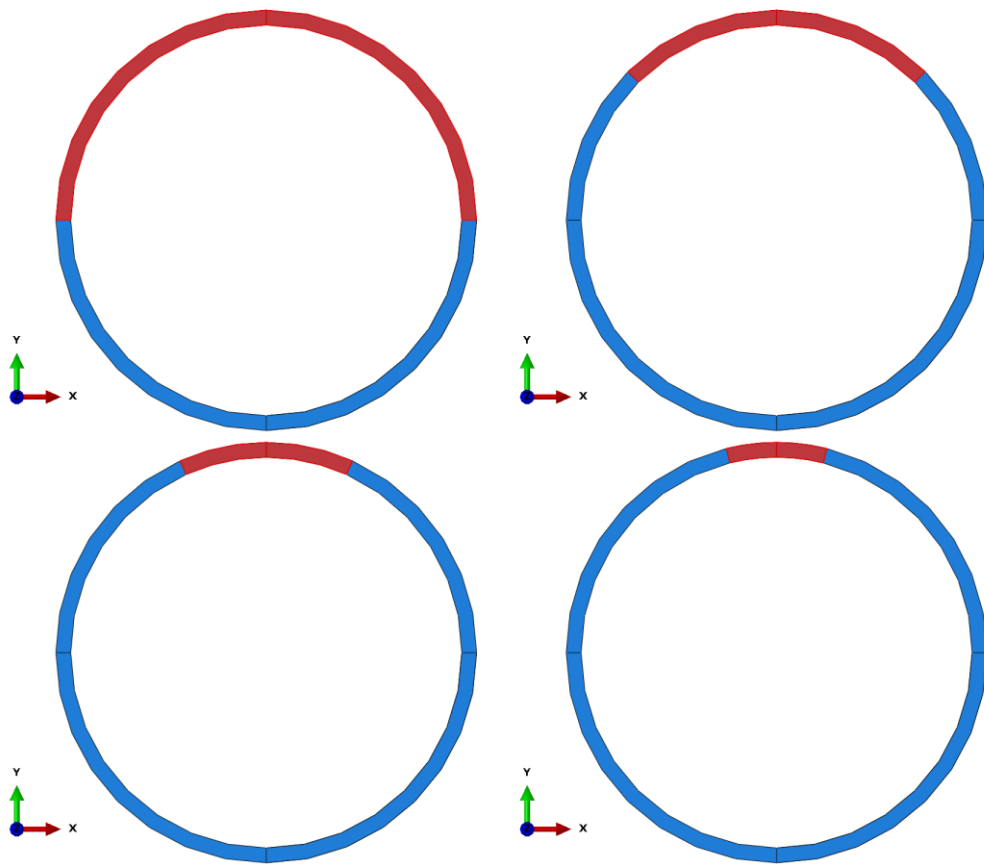
Hengittävä särö mallinnettiin käyttämällä *tie*-sidosyhtälöä (*tie constraint*) ja yleistä kontaktialgoritmia (*general contact*). Särö mallinnettiin 10 mm:n etäisyydelle rakenteen juuresta, kahden lyhyen osan (Osat 1 & 2) väliin. Osien väliin luotiin särön kohdalle kitkatomat kontaktipinnat ja muilta osin pinnat kiinnitettiin toisiinsa käyttämällä *tie*-sidosyhtälöä. Näin särö avautuu taivutuksessa alaspäin, mutta siirtää normaalivoimia ylöspäin taivutettaessa. Kuvassa 7 on esitetty leikkaus rakenteesta, jossa on korostettu punaisella pinnat, joille särö on luotu.



Kuva 7. Leikkaus rakenteesta (kuvassa 25 % särö).

Avoin särö mallinnettiin muuten samoin kuin hengittävä särö, mutta kontaktia ei luotu särön pinnoille. Näin mallinnettu rakenne käyttäytyy lineaarisesti ja analysoimiseen voitiin käyttää *Frequency*- ja *Modal Dynamics*-analyysiaskeleita, mikä lyhentää huomattavasti simulointiin vaadittavaa aikaa.

Erikokoisia säröjä mallinnettiin yhteensä neljä kappaletta (kuva 8) joissa särön koot olivat 50 %, 25 %, 13,5 % ja 7,7 % profiilin pinta-alasta. Säröt mallinnettiin profiilin säteen suuntaisesti elementtirajoja pitkin, mikä mahdollisti identtisen elementtiverkon käyttämisen kaikissa malleissa.



Kuva 8. Mallinnetut säröt (50 %, 25 %, 13,5 %, ja 7,7 % profiilin pinta-alasta).

Analysoitavan rakenteen mallintaminen kaikkineen työvaiheineen on esitetty liitteessä 2 olevassa työohjeessa.

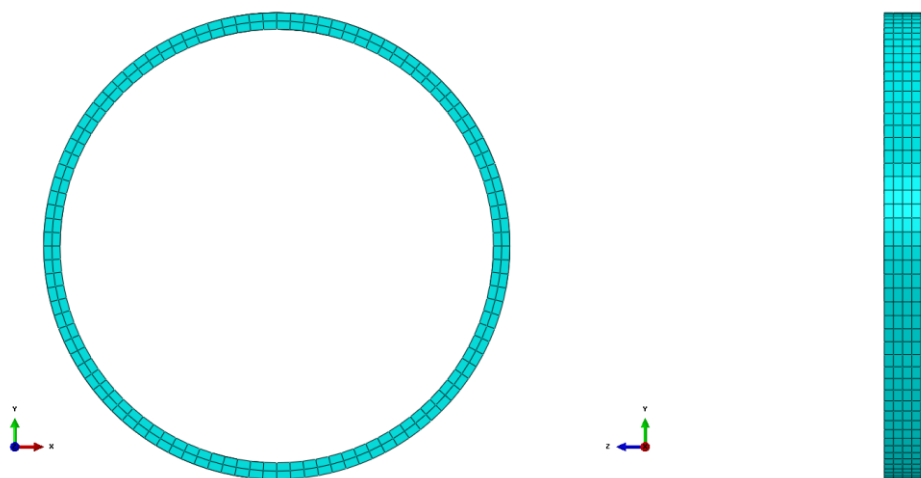
5 Elementtiverkko ja mallin validointi

5.1 Elementtiverkko

5.1.1 Testattavat elementtiverkot

Riippumatta käytettävästä elementtityypistä, parhaan mahdollisen tuloksen takamiseksi elementtiverkon tulisi olla suhteellisen säännöllinen. Käytettäessä tiiliskivielementtejä kuten C3D8, C3D8R ja C3D8I, elementtien tulisi olla muodoltaan mahdollisimman kuutiomaisia. Esimerkiksi elementin suunnikasmaisuus tai trapetsoidimaisuus saattaa heikentää huomattavasti tulosten tarkkuutta.

Elementtiverkko rakenteen alkupäässä (0 - 20 mm) särön ympärillä on loppurakennetta (20 - 2000 mm) tiheämpi särömallinnuksen tarkkuuden parantamiseksi. Rakenteen alkupäässä profiilin seinämänpaksuuden yli elementtejä on kaksi ja rakenteen kehällä elementtien lukumäärä on 104 (kuva 9). Pituussuunnassa elementtitiheys on 5 elementtiä per 10 mm.



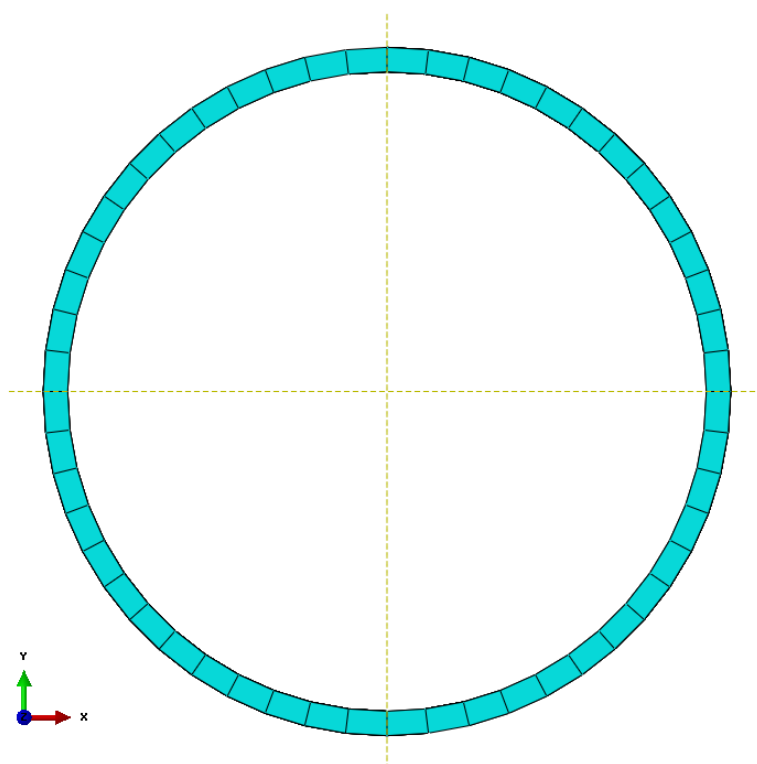
Kuva 9. Rakenteen alkuosan elementtiverkko.

Loppurakenteen muodostavassa osassa (20 - 2000 mm) seinämänpaksuuden yli on yksi elementti ja rakenteen kehällä elementtien lukumäärä on 52 (kuva 10). Loppuosassa testattiin kolmea eri elementtiverkon pituussuuntaista tiheyttä tulostarkkuus – laskenta-

aika -suhteen optimoimiseksi. Tiheässä elementtiverkossa elementtien lukumäärä pituussuunnassa osiolla 20 - 2000 mm oli 288 kpl, keskitiheässä 144 kpl ja harvassa 72 kpl. Elementtien ja solmujen lukumäärät kussakin mallissa on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Elementtien ja solmujen lukumäärät.

Elementtiverkko	Elementtien määrä	Solmujen määrä
Tiheä	17056	33800
Keskitiheä	9568	18824
Harva	5824	11336



Kuva 10. Rakenteen loppuosan elementtiverkko.

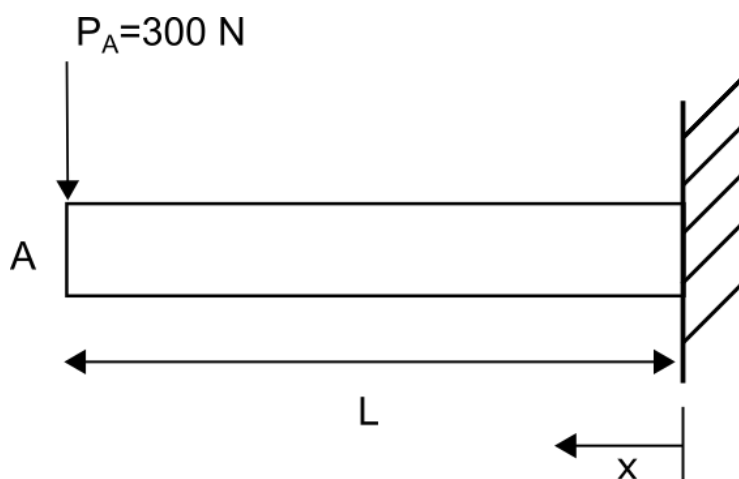
5.1.2 Testattavat elementtityypit

Käytettävän elementin valinta perustui kolmen eri tilavuuselementin, C3D8, C3D8R ja C3D8I, vertailuun. Elementtityyppien lisäksi vertailtiin myös kolmea eri elementtiverkon tiheyttä, *tiheää*, *keskitiheää* ja *harvaa*.

Lopullisessa mallissa käytettävän elementtityypin ja elementtiverkon valintaa varten suoritettiin kolme testiä, joiden perusteella valinta suoritettiin. Testeissä käytettiin mallia ehjästä rakenteesta.

1. Ominaistaajuuksien vertailu - numeerisesti ratkaistuja rakenteen ominaistaajuuksia verrattiin analyttisiin ratkaisuihin.
2. Taipuma rakenteen vapaassa päässä - testissä tarkasteltiin rakenteen vapaan päään taipumaa kuormituksen vaikutuksesta ja verrattiin numeerisesti laskettuja tuloksia analyttisiin ratkaisuihin.
3. Taipumat rakenteen koko matkalta - testissä tarkasteltiin taipumia koko rakenteen matkalta kuormituksen vaikutuksesta ja verrattiin numeerisesti laskettuja tuloksia analyttisiin ratkaisuihin.

Testeissä 2 ja 3 tutkittavaa rakennetta kuormitettiin 300 N:n voimalla rakenteen vapaassa päässä kuvan 11 mukaisesti ja verrattiin analyttisin menetelmin laskettuja taipumia numeerisiin ratkaisuihin. Analyttinen menetelmä perustuu palkkimalliin, jolla voidaan laskea muun muassa taipumia palkkimaisille rakenteille.



Kuva 11. Rakennetta kuormittava voima testeissä 2 ja 3.

Testien tarkoituksena oli luoda perusteet tietyn elementtityypin ja elementtiverkon tiheyden käyttämiselle.

5.2 Testaus ja mallin validointi

5.2.1 Ominaistaajuuksien vertailu

Analyttinen ratkaisu

Rakenteelle ratkaistiin viisi ensimmäistä ominaistaajuutta käyttämällä analyttistä ratkaisukaavaa palkkimaisille rakenteille [11 s. 765]. Ominaistaajuudet saadaan ratkaistua yhtälöstä

$$f_n = \frac{K_n}{2 \pi L^2} \sqrt{\frac{E I}{\rho A}} \quad (18)$$

jossa f_n on muodon n ominaistaajuus

K_n on palkin reunaehdoista riippuva vakio muodon n laskemiseen

L on palkin pituus

E on materiaalin kimmokerroin

ρ on materiaalin tiheys

A on profiilin poikkipinta-ala

I on profiilin jäyhyysmomentti, joka saadaan laskettua yhtälöstä

$$I = \frac{\pi}{64} (D^4 - d^4) \quad (19)$$

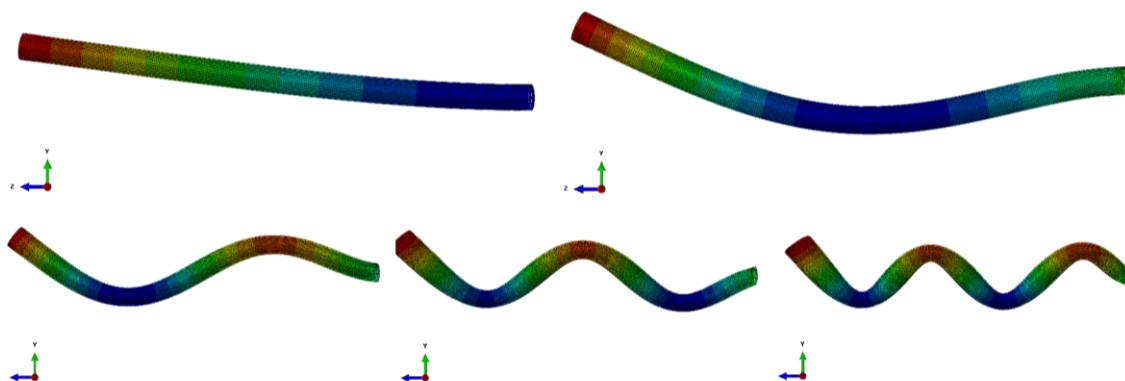
Ensimmäiset viisi ratkaistua poikittaista ominaistaajuutta on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Ensimmäiset viisi poikittaista ominaistaajuutta.

n	K_n	f_n (Hz)
1	3,52	25,06
2	22,0	156,6
3	61,7	439,2
4	121	861,3
5	200	1423,6

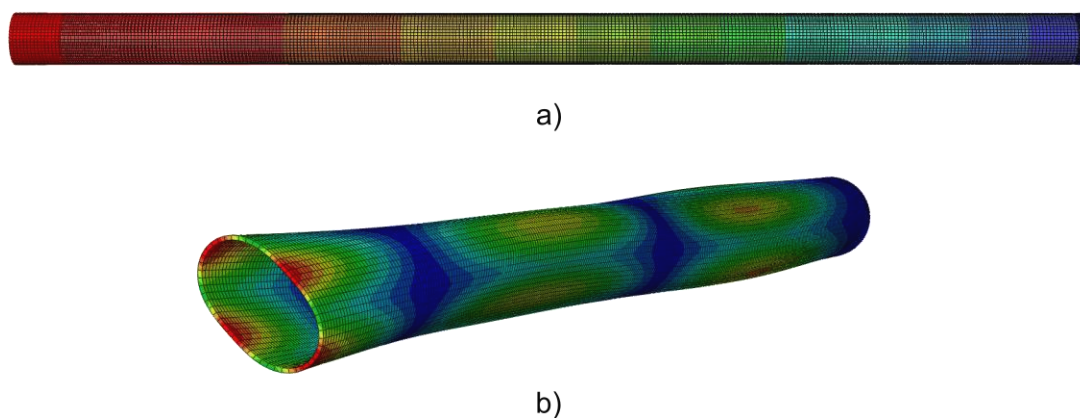
Numeerinen ratkaisu (Abaqus/Standard)

Abaquksella ratkaistiin rakenteen ominaistaajuudet ehjästä mallista käyttämällä kutakin (C3D8, C3D8R, C3D8I) elementtiä ja *tiheää* elementtiverkkoa. Ominaisuustaajuudet ratkaistiin käyttämällä *Frequency*-askelta ja tuloksista poimittiin viisi ensimmäistä poikittaista ominaistaajuutta ja ominaismuotoa (kuva 12).



Kuva 12. Viisi ensimmäistä poikittaista ominaismuotoa.

Rakenteessa esiintyy poikittaisten ominaismuotojen lisäksi myös pitkittäisiä ominaismuotoja ja niin sanottuja hengittäviä ominaismuotoja, joista on esitetty esimerkit kuvassa 13.



Kuva 13. Esimerkki a) pitkittäisestä ominaismuodosta ja b) hengittävästä ominaismuodosta.

Ominaistaajuusanalyysistä saadut eri elementtityyppien ominaistaajuudet on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. Ominaistaajuusanalyysin tulokset.

Muoto	C3D8	C3D8R	C3D8I
n	f_n (Hz)	f_n (Hz)	f_n (Hz)
1	24,93	24,89	24,92
2	152,6	152,4	152,5
3	412,6	412,0	412,4
4	772,2	771,1	771,9
5	1210,7	1208,9	1210,2

Tulosten vertailua

Numeerisesti ratkaistuja ominaistaajuuksia verrattiin analyttisin menetelmin saatuihin tuloksiin. Taulukossa 5 on esitetty analyttiset ratkaisut viidestä matalimmasta poikittaisesta ominaistaajuudesta sekä vastaavien numeerisesti ratkaistujen ominaistaajuuksien prosentuaalinen ero analyttisiin ratkaisuihin.

Taulukko 5. Numeerisesti ratkaistujen ominaistaajuuksien ero analyttisiin ratkaisuihin.

n	f_n (Hz)	C3D8	C3D8R	C3D8I
1	25,06	-0,52 %	-0,65 %	-0,56 %
2	156,6	-2,61 %	-2,75 %	-2,65 %
3	439,2	-6,25 %	-6,38 %	-6,29 %
4	861,3	-10,91 %	-11,05 %	-10,95 %
5	1423,6	-16,17 %	-16,31 %	-16,21 %

Tuloksista nähdään se, että mitä korkeampi ominaismuoto, sitä suurempi on analyttisen ja numeerisen ratkaisun ero. Elementtityyppien välinen ero on kuitenkin niin pieni, että ominaistaajuusanalyysin perusteella ei voida tehdä päätöstä mallissa käytettävästä elementtityypistä.

5.2.2 Taipuma rakenteen vapaassa päässä

Analyttinen ratkaisu

Kun halutaan ratkaista palkin taipuma voiman vaikutuspisteessä, on energiamenetelmän käyttäminen yksinkertainen ratkaisu. Energiamenetelmää käyttämällä myös leikkausjännityksestä aiheutuva taipuma pystytään laskemaan helposti.

Rakenteen taivutustestissä ratkaistiin energiamenetelmää käyttämällä rakenteen vapaan pään taipuma pisteessä A, kun pisteeseen vaikuttaa 300 N:n voima P_A (kuva 11).

Ulokepalkin taivutuksesta aiheutuva muodonmuutosenergia U_M saadaan yhtälöstä

$$U_M = \int_0^L \frac{M(x)^2}{2EI} dx \quad (20)$$

ja leikkausvoimasta aiheutuva muodonmuutosenergia U_Q yhtälöstä

$$U_Q = \xi \int_0^L \frac{Q(x)^2}{2GA} dx \quad (21)$$

missä ξ on poikkileikkauksen muodosta riippuva siirtymäkerroin, G materiaalin liukukerroin ja A profiiliin poikkipinta-ala. Siirtymäkerroin ξ on suorakaidepoikkipinnalle $\frac{6}{5}$, ja ympyräpoikkipinnalle $\frac{10}{9}$. Muille profiileille, kuten putkiprofiilille, voidaan käyttää ξ :n arvoa 1.

Materiaalin liukukerroin G saadaan laskettua yhtälöstä

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (22)$$

Rakenteen yhteenlaskettu muodonmuutosenergia U saadaan laskemalla U_M ja U_Q yhteen.

$$U = U_M + U_Q = \int_0^L \frac{M(x)^2}{2EI} dx + \xi \int_0^L \frac{Q(x)^2}{2GA} dx \quad (23)$$

Sijoittamalla kokonaismuodonmuutosenergian yhtälöön voimasta P_A aiheutuvan momentin yhtälö

$$M(x) = P_A(L - x) \quad (24)$$

sekä voimasta P_A aiheutuva leikkausvoiman yhtälö

$$Q(x) = P_A \quad (25)$$

ja integroimalla yhtälö rakenteen pituuden L yli, saadaan rakenteen kokonaismuodonmuutosenergia U ratkaistua.

$$U = \frac{P_A^2 L^3}{6EI} + \xi \frac{P_A^2 L}{2GA} \quad (26)$$

Taipuma δ_A pisteessä A saadaan derivoimalla kokonaismuodonmuutosenergian yhtälö U voiman P_A suhteen ja sijoittamalla tunnetut arvot yhtälöön

$$\delta_A = \frac{\partial U}{\partial P_A} = \frac{P_A L^3}{3EI} + \xi \frac{P_A L}{GA} \quad (27)$$

$$\delta_A = -2,8796 \text{ mm}$$

Siirtymäkertoimelle ξ käytettiin arvoa 1.

Verrataan vielä kokonaismuodonmuutosenergian yhtälöstä saatua taipumaa pelkkään taivutuksesta aiheutuvaan taipumaan. Pelkästä taivutuksesta aiheutuva taipuma v_A pisteessä A saadaan jättämällä taipuman δ_A yhtälöstä leikkausvoiman osuus pois.

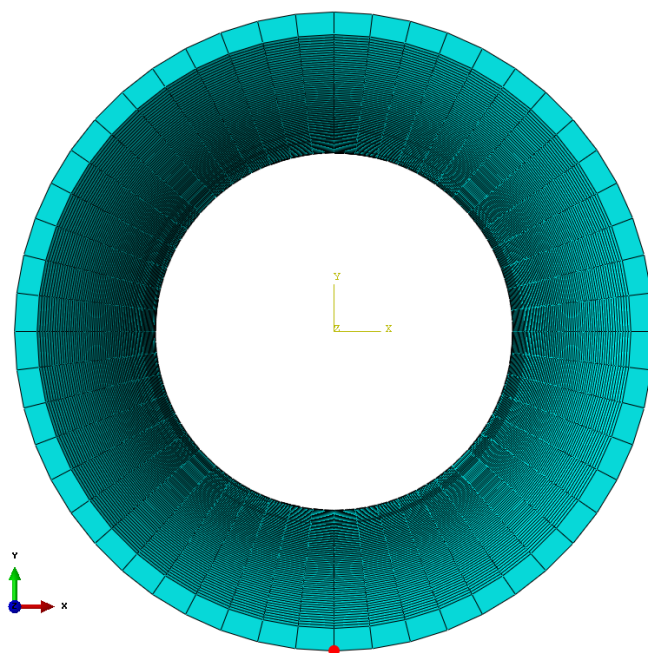
$$v_A = \frac{P_A L^3}{3EI} \quad (28)$$

$$v_A = -2,8729 \text{ mm}$$

Tästä nähdään, että leikkausvoimasta aiheutuva taipuma on tässä tapauksessa erittäin pieni, noin 0,23 %.

Numeerinen ratkaisu (Abaqus/Standard)

Abaquksen *Static General* -analyysiaskelta käyttämällä ratkaistiin taipuma rakenteen päädyssä, profiilin alareunan solmussa 11 (kuva 14), kun rakenteen vapaaseen päähän kohdistui 300 N:n taivuttava voima. Testi suoritettiin kullekin elementtityypille ja elementtiverkon tiheydelle.

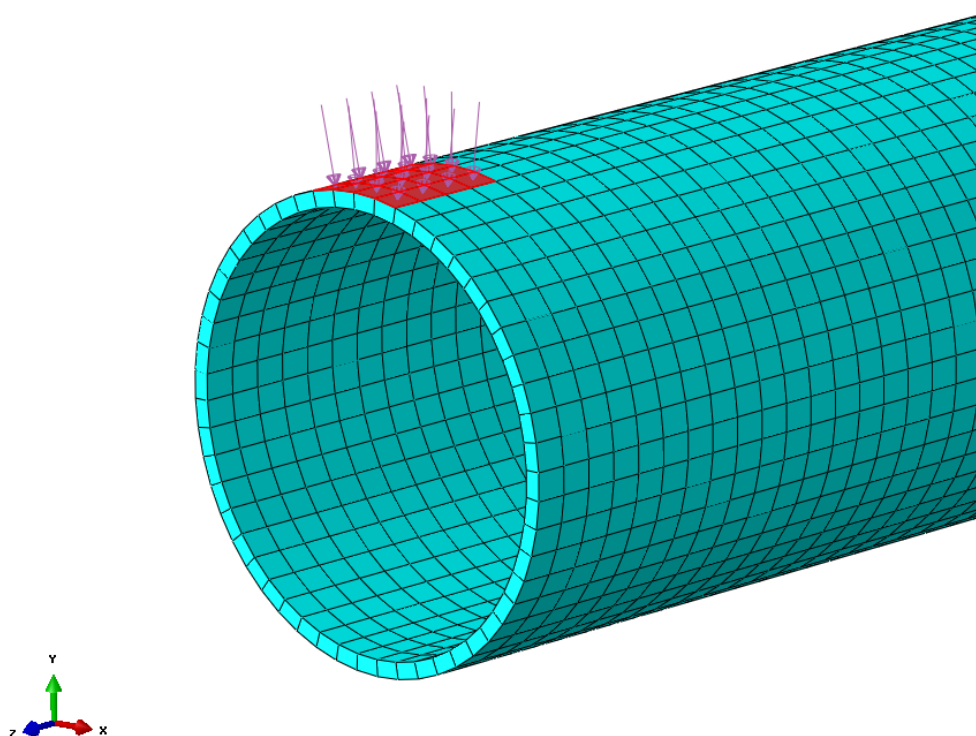


Kuva 14. Solmu josta taipuma mitattiin (mittaussolmu on merkitty kuvaan punaisella).

Rakenteeseen vaikuttava voima (300 N) kohdistettiin rakenteen vapaaseen päähän putken yläpintaan pintapaineena usean elementin alueelle (kuva 15). Voima jaettiin usean elementin alueelle, jotta vältettäisiin ei-halutut paikalliset muodonmuutokset, joita saat-
taa ilmetä rakenteeseen, mikäli siihen kohdistettaisiin yksittäinen pistevoima. Koska ra-

kenteeseen vaikuttava voima on jaettu usean elementin alueelle, voimaresultantti ei vaikuta aivan rakenteen päässä kuten analyttisessä ratkaisussa, mikä vaikuttaa vertailutarkkuuteen. Myös taivuttavan voiman antaminen pintapaineena vaikuttaa vertailutarkkuuteen, sillä rakenteen kaarevuuden vuoksi voiman pystykomponentti on hieman pienempi kuin haluttu 300 N.

Koska kaikki elementtityypit ja elementtiverkon tiheydet testattiin yhdenmukaisesti, voidaan vertailua pitää luotettavana. Lopulliseen malliin valittu elementtityyppi testattiin vielä ennen lopullista valintaa tarkemmalla staattisella tarkastelulla, missä vaikuttava voima on kohdistettu aivan rakenteen pätyyn kuten analyttisessä ratkaisussa. Vaikka eri malleilla oli elementtiverkon tiheydessä eroja, valittiin elementit kaikissa malleissa siten, että voiman vaikutusalue oli riippumaton elementtiverkon tiheydestä.



Kuva 15. Voiman vaikutusalue (kuvassa tiheä elementtiverkko).

Taulukossa 6 on esitetty taipumien itseisarvot rakenteen vapaassa päässä solmussa 11 kullakin elementtityypillä ja elementtiverkon tiheydellä.

Taulukko 6. Taipumat solmussa 11.

Elementtiverkon tiheys	C3D8 U2 (mm)	C3D8R U2 (mm)	C3D8I U2 (mm)
Harva	2,7768	2,5526	2,8254
Keskitiheä	2,8166	2,4546	2,8254
Tiheä	2,8268	2,4163	2,8254

Tulosten vertailua

Energiamenetelmää käyttämällä ratkaistiin taipuma palkin päässä sekä huomioimalla leikkausvoimasta aiheutuva muodonmuutos että ilman leikkausvoiman vaikutusta. Leikkausvoiman vaikutus muodonmuutokseen on kuitenkin erittäin pieni (n. 0,23 %), eikä sitä huomioida mallien testauksissa lukuun ottamatta lopulliseen malliin valitun elementtityypin vahvistusta, joka on esitetty kappaleessa 5.3.

Energiamenetelmällä saatu taipuma palkin päässä ilman leikkausvoiman vaikutusta (v_A) ja Abaquksella ratkaistut taipumat kullekin mallille palkin päässä solmussa 11, on esitetty taulukossa 7.

Taulukko 7. Taipumat palkin päässä.

Elementtiverkon tiheys	Analyttinen $ v_A $ (mm)	C3D8 U2 (mm)	C3D8R U2 (mm)	C3D8I U2 (mm)
Harva	2,873	2,7768	2,5526	2,8254
Keskitiheä	2,873	2,8166	2,4546	2,8254
Tiheä	2,873	2,8268	2,4163	2,8254

Kaikilla elementtityypeillä ja elementtiverkoilla siirtymä palkin päässä on pienempi kuin analyttisellä menetelmällä saatu siirtymä. Testattujen mallien prosentuaaliset erot energiamenetelmällä saatuun ratkaisuun on esitetty taulukossa 8.

Taulukko 8. Testattujen mallien prosentuaalinen ero analyttiseen ratkaisuun. (Pienin ero on merkitty vihreällä, toiseksi pienin keltaisella ja suurin punaisella.)

Elementtiverkon tiheys	C3D8	C3D8R	C3D8I
Harva	3,41 %	11,81 %	1,67 %
Keskitiheä	1,98 %	15,71 %	1,67 %
Tiheä	1,62 %	17,27 %	1,67 %

Tuloksista nähdään, että elementtityyppi C3D8R suoriutui testistä kaikilla elementtiverkon tiheyksillä elementtityyppejä C3D8 ja C3D8I huonommin. C3D8I sen sijaan suoriutui tasaisimmin testistä, eron pysyessä kaikilla elementtiverkon tiheyksillä vakiona (1,67 %) analyttiseen ratkaisuun verrattuna. Elementtityyppi C3D8:lla tarkkuus parani elementtiverkon tiheyttä kasvatettaessa.

Saatujen tulosten perusteella testiin, jossa verrattiin rakenteen taipumaa eri elementtityypeillä ja elementtiverkon tiheyksillä koko rakenteen matkalla, valittiin elementtityypit C3D8 ja C3D8I.

5.2.3 Taipumat koko rakenteen matkalla

Analyttinen ratkaisu

Analyttinen ratkaisu taipumalle koko rakenteen matkalla saadaan kimmoviivan yhtälöstä

$$v''(x) = \frac{M(x)}{EI}. \quad (29)$$

Integroimalla yhtälö saadaan ratkaistua palkin kiertymä $v'(x)$ ja taipuma $v(x)$.

$$M(x) = P_A(L - x) \quad (24)$$

$$v'(x) = \int \frac{P_A(L - x)}{EI} dx = \frac{P_A}{EI} \int L - x dx$$

$$v'(x) = \frac{P_A x}{EI} \left(L - \frac{x}{2} \right) + c_1 \quad (30)$$

Integroimisvakio $c_1 = 0$, sillä tapauksen ulokepalkille $v'(0) = 0$

$$v(x) = \int \frac{P_A x}{EI} \left(L - \frac{x}{2} \right) dx$$

$$v(x) = \frac{P_A x^2}{6EI} (3L - x) + c_2$$

Integroimisvakio $c_2 = 0$, sillä tapauksen ulokepalkille $v(0) = 0$, joten taipumalle $v(x)$ saadaan yhtälö

$$v(x) = \frac{P_A x^2}{6EI} (3L - x) \quad (31)$$

jossa x on etäisyys palkin juuresta ja P_A taivuttava 300 N:n voima.

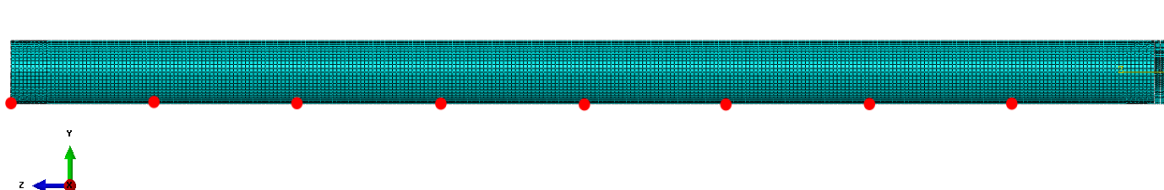
Rakenteen koko pituudelta valittiin tasaisin välein kahdeksan mittauspistettä, joissa laskettiin taipumat. Mittauspisteet valittiin siten, että samat mittaussolmut pystyttiin valitsemaan kaikista testattavista malleista. Yhtälöstä 31 ratkaistut taipumat mittauspisteissä on esitetty taulukossa 9.

Taulukko 9. Taipumat mittauspisteissä (x on etäisyys palkin juuresta).

x	$ v(x) $
mm	mm
267,5	0,0737
515	0,2612
762,5	0,5468
1010	0,9140
1257,5	1,3465
1505	1,8281
1752,5	2,3423
2000	2,8729

Numeerinen ratkaisu (Abaqus/Standard)

Abaquksen *Static General* -analyysiaskelta käyttämällä ratkaistiin taipuma valituissa mitaussolmuissa (kuva 16), kun rakenteen vapaaseen päähän kohdistui sama 300 N:n taivuttava voima kuin edellisessä testissä, jossa verrattiin taipumaa rakenteen päädyssä. Testi tehtiin kaikille elementtiverkon tiheyksille elementtityypeille C3D8 ja C3D8I.



Kuva 16. Mittaussolmut (kuvassa tiheä elementtiverkko).

Taulukossa 10 on esitetty taipumat mitaussolmuissa kullakin elementtiverkon tiheydellä ja elementtityypillä.

Taulukko 10. Taipumat mitaussolmuissa (huom. Abaqus-malleissa pituussuuntainen akseli on z-akseli).

Mittaussolmun sijainti	Harva elementtiverkko		Keskitiheä elementtiverkko		Tiheä elementtiverkko	
	C3D8	C3D8I	C3D8	C3D8I	C3D8	C3D8I
mm	U2 mm	U2 mm	U2 mm	U2 mm	U2 mm	U2 mm
267,5	0,0742	0,0752	0,0750	0,0752	0,0752	0,0753
515	0,2571	0,2614	0,2604	0,2614	0,2613	0,2615
762,5	0,5348	0,5443	0,5421	0,5443	0,5439	0,5443
1010	0,8913	0,9075	0,9038	0,9076	0,9069	0,9076
1257,5	1,3107	1,3349	1,3293	1,3350	1,3340	1,3350
1505	1,7774	1,8106	1,8027	1,8107	1,8092	1,8107
1752,5	2,2749	2,3172	2,3076	2,3174	2,3159	2,3174
2000	2,7768	2,8254	2,8166	2,8254	2,8268	2,8254

Tulosten vertailua

Tulosten vertailuun käytettiin taipumien prosentuaalista eroa FEM-mallien ja analyyttisen ratkaisun välillä. Tulosten prosentuaalinen ero analyyttiseen ratkaisuun eri elementtiverkon tiheyksillä ja elementtityypeillä on esitetty taulukossa 11.

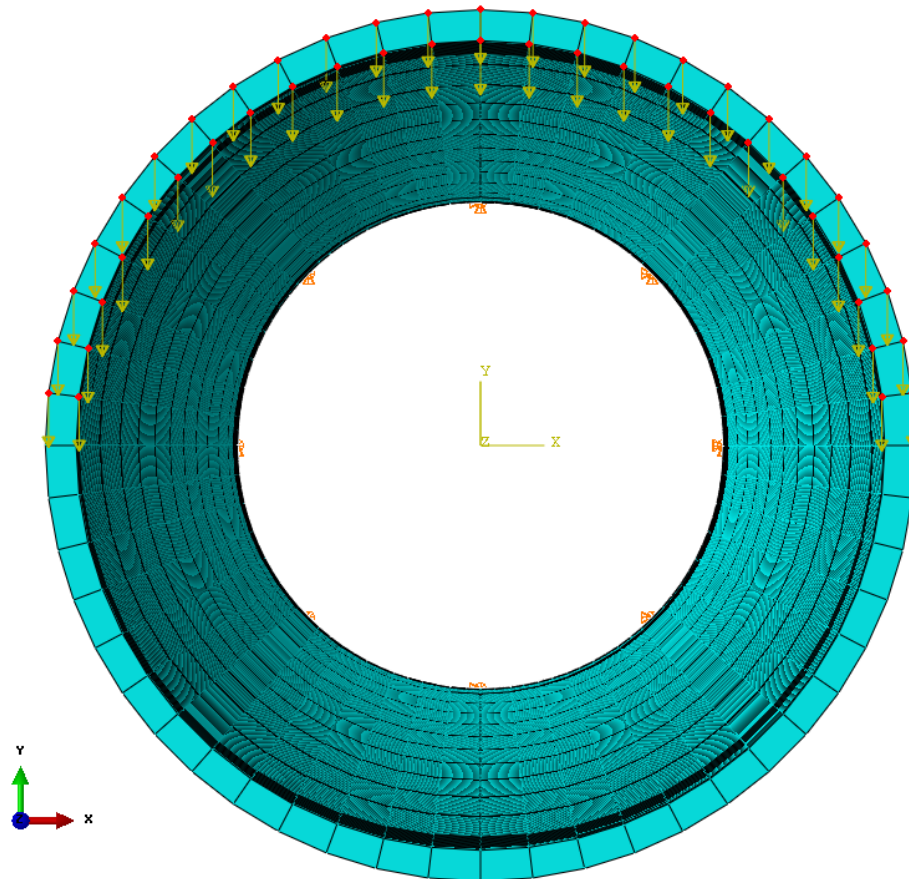
Taulukko 11. Taipumien prosentuaalinen ero analyyttiseen ratkaisuun kullakin elementtiverkon tiheydellä ja elementtityypillä. (Pienempi ero analyyttiseen ratkaisuun on esitetty vihreällä ja suurempi ero punaisella.)

Sijainti	Taipuma	Harva		Keskitiheä		Tiheä	
x	$ v(x) $	C3D8	C3D8I	C3D8	C3D8I	C3D8	C3D8I
mm	mm	[%-ero]	[%-ero]	[%-ero]	[%-ero]	[%-ero]	[%-ero]
267,5	0,0737	0,76 %	2,12 %	1,83 %	2,14 %	2,10 %	2,15 %
515	0,2612	1,59 %	0,07 %	0,30 %	0,09 %	0,03 %	0,09 %
762,5	0,5468	2,22 %	0,46 %	0,86 %	0,45 %	0,52 %	0,45 %
1010	0,9140	2,51 %	0,71 %	1,13 %	0,70 %	0,77 %	0,70 %
1257,5	1,3465	2,69 %	0,87 %	1,29 %	0,86 %	0,93 %	0,86 %
1505	1,8281	2,81 %	0,96 %	1,40 %	0,96 %	1,04 %	0,95 %
1752,5	2,3423	2,92 %	1,08 %	1,49 %	1,07 %	1,13 %	1,07 %
2000	2,8729	3,40 %	1,67 %	1,98 %	1,67 %	1,62 %	1,67 %

Tuloksista havaitaan, että elementtityyppi C3D8I suoriutui testistä kaikilla elementtiverkon tiheyksillä yhtä hyvin, kun taas C3D8-elementtityypillä tarkkuus parani tiheämmillä elementtiverkoilla.

5.3 Elementtityypin ja elementtiverkon valinta

Abaquksella numeerisesti ratkaistut taipumat erosivat oletettua enemmän analyyttisistä ratkaisuksista. Vaikka pintapaineesta aiheutunut voimaresultantti sijaitsi testeissä vain 13,75 mm:n etäisyydellä rakenteen vapaasta päästä, sillä oli kuitenkin suurempi vaikutus testin tuloksiin kuin testejä suunniteltaessa osattiin odottaa. Tämän vuoksi taipumat ratkaistiin tasaisimmin suoriutuneella C3D8I-elementtityypillä ja tiheällä elementtiverkolla vielä kerran siten, että taivuttava voima on kohdistettu kuvan 17 mukaisesti rakenteen päässä sijaitseviin solmuihin.



Kuva 17. Voiman vaikutussolmut.

Solmuja, joihin taivuttava voima kohdistetaan, on yhteensä 50 kpl, joten kuhunkin solmuun vaikuttaa 6 N:n voima. Taulukossa 12 on esitetty taipumat sekä uudesta mallista, jossa vaikuttavat voimat kohdistuvat rakenteen vapaan pään solmuihin, että aiemmin testatusta mallista, jossa taivuttavana voimana vaikuttaa rakenteen pintaan kohdistuva pintapaine.

Taulukko 12. Taipumat C3D8I-elementtityypillä ja tiheällä elementtiverkolla. Vaikuttava voima solmuissa sekä pintapaineena.

Sijainti	Analyttinen ratkaisu	C3D8I (solmuvoimat)	C3D8I (pintapaine)
x	$ v(x) $	U2	U2
mm	mm	mm	mm
267,5	0,0737	0,0765	0,0753
515	0,2612	0,2658	0,2615
762,5	0,5468	0,5537	0,5443
1010	0,9140	0,9235	0,9076
1257,5	1,3465	1,3591	1,3350
1505	1,8281	1,8440	1,8107
1752,5	2,3423	2,3617	2,3174
2000	2,8729	2,8867	2,8254

Tuloksista nähdään, että taipumat ovat suurempia mallissa, jossa vaikuttava voima on kohdistettu päädyn solmuihin kuin mallissa, jossa voima vaikuttaa pintapaineena. Uudessa mallilla taipumat ovat myös koko rakenteen matkalla suurempia kuin analyttisellä ratkaisulla saadut taipumat, mikä on odotettua, sillä kimmoviivan yhtälöstä saatu analyttinen ratkaisu ei huomioi leikkausvoimasta aiheutuvaa muodonmuutosta. Malleista ratkaistujen taipumien ero analyttiseen ratkaisuun on esitetty taulukossa 13.

Taulukko 13. Taipumien prosentuaalinen ero analyttiseen ratkaisuun. Lähimpänä analyttistä ratkaisua olevat tulokset on lihavoitu.

x	$ v(x) $	C3D8I (solmuvoimat)	C3D8I (pintapaine)
mm	mm	%-ero	%-ero
267,5	0,0737	3,77 %	2,15 %
515	0,2612	1,75 %	0,09 %
762,5	0,5468	1,25 %	-0,45 %
1010	0,9140	1,04 %	-0,70 %
1257,5	1,3465	0,93 %	-0,86 %
1505	1,8281	0,87 %	-0,95 %
1752,5	2,3423	0,82 %	-1,07 %
2000	2,8729	0,48 %	-1,67 %

Kun verrataan vielä taipumaa rakenteen vapaassa päässä mallilla, jossa voimat vaikuttavat rakenteen vapaan pään solmuissa, ja aiemmin energiamenetelmällä laskettua taipumaa, jossa on huomioitu myös leikkausvoimasta aiheutuva muodonmuutos, niin havaitaan, että taipumien ero rakenteen päässä on vain 0,25 %.

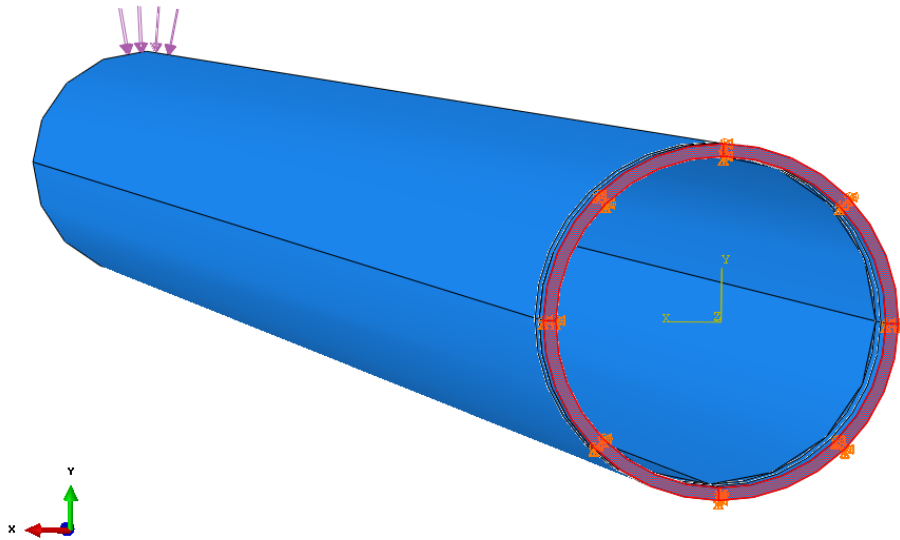
Suoritettujen testien perusteella käytettäväksi elementtityypiksi valittiin C3D8I ja elementtiverkoksi *tiheä* elementtiverkko. Elementtityyppien C3D8 ja C3D8I välillä ei ollut testien tuloksissa suurta eroa tiheimmällä elementtiverkolla, mutta C3D8I suoriutui testeistä kaikilla elementtiverkon tiheyksillä kutakuinkin yhtä hyvin. Vaikka tässä työssä käytettiin tiheää elementtiverkkoa, on näiden testien perusteella mahdollista käyttää C3D8I elementtityyppiä myös harvemmillä elementtiverkoilla simuloinnin nopeuttamiseksi, saaden silti keskenään vertailukelpoisia tuloksia.

6 Simulointi

6.1 Simuloitavat mallit

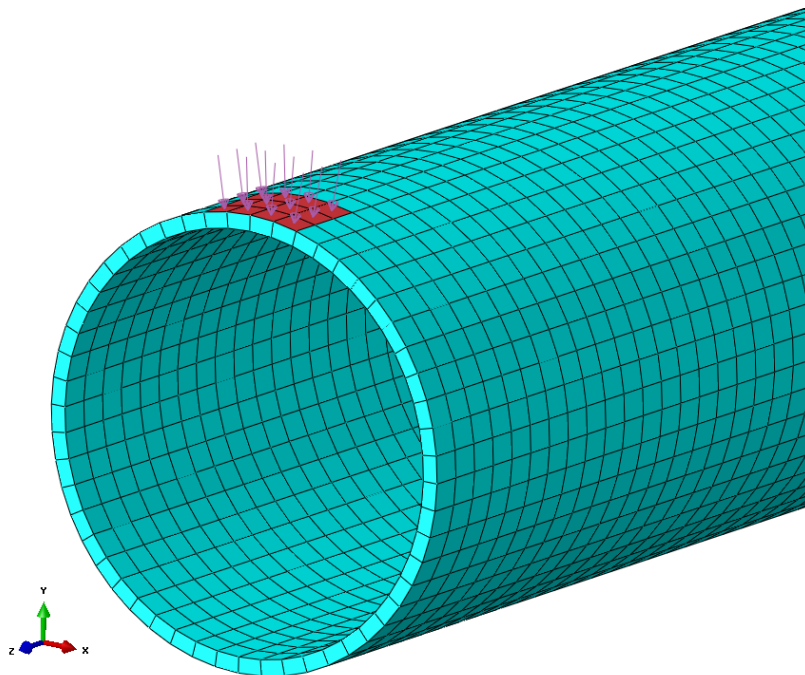
Vaikka tämän insinööriyön pääpaino oli hengittävän särön mallintamisessa ja käyttämisessä värähtelysimulaatiossa, mallinnettiin rakenne myös avoimella säröllä. Simulointiin käytettiin hengittävälle särölle Abaqus/Explicitin *Dynamic Explicit* -analyysiaskelta ja avoimelle särölle Abaqus/Standardin *Frequency*- ja *Modal Dynamics* -analyysiaskeleita. Simuloitavia malleja oli yhteensä 12 kpl, molemmilla särötyypeillä kaksi ehjää ja neljä erikokoista säröä. Säröjen koot olivat 50 %, 25 %, 13,5 % ja 7,7 % profiilin pinta-alasta.

Simuloitavat mallit olivat muuten identtisiä molemmilla särötyypeillä, mutta avoimessa särössä kontakti särön pinnoilta oli poistettu. Malleissa käytettiin *tiheää* elementtiverkkoa ja elementtityyppiä C3D8I. Rakenteeseen vaikuttava satunnaisheräte vaikutti rakenteen vapaassa päässä ja rakenne oli kiinnitetty juuresta jäykästi lukitsemalla profiilin pinnan vapausasteet kuvan 18 mukaisesti.



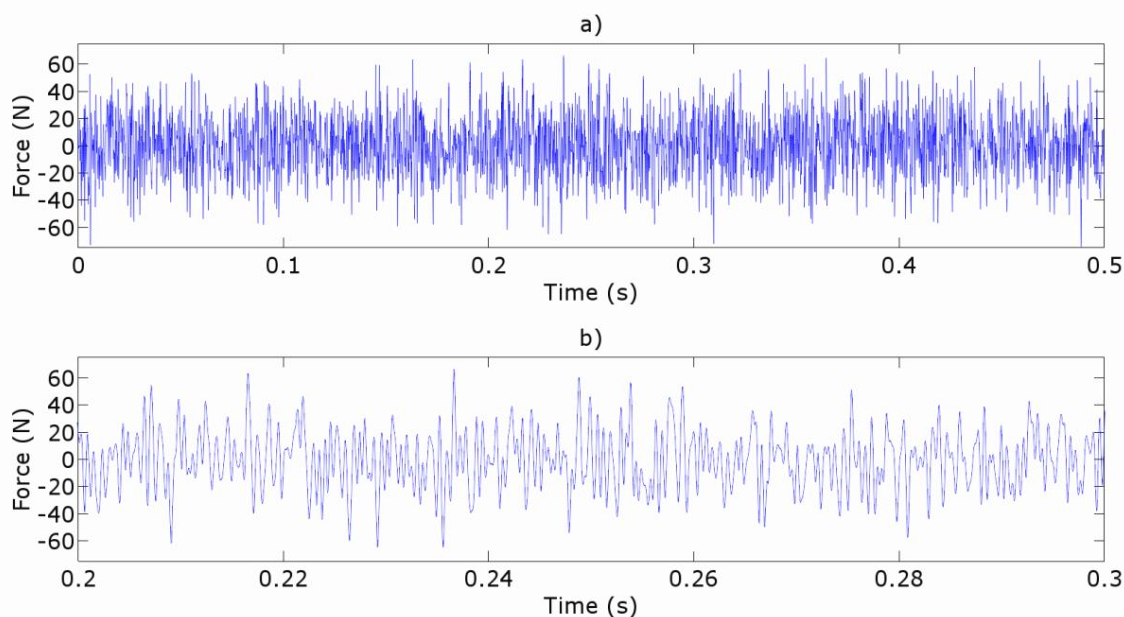
Kuva 18. Lukitut vapausasteet (U1, U2, U3) kiinnityspinnassa rakenteen juuressa.

Simulointiaika malleilla oli 0,5 s, jonka aikana rakenteen vapaaseen päähän vaikutti satunnaisheräte. Heräte annettiin painevoimana yhteensä kahdentoista elementin alueelle kuvan 19 mukaisesti.



Kuva 19. Herätteen vaikutusalue.

Vertailudata (*training set*) vaurion tunnistusta varten luotiin simuloimalla ehjän rakenteen värähtelyä kahdella eri satunnaisherätteellä (kuva 20). Tämän jälkeen kukin särömalli simuloitiin käyttämällä eri kuormitushistoriaa. Kullekin vauriotilalle käytettiin kuitenkin vertailun helpottamiseksi samaa kuormitushistoriaa sekä hengittävällä säröllä että avoimella säröllä. Kuormitushistoria annettiin *smooth step* -amplitudina terävien iskumaisten kuormitusten välttämiseksi. Kuormituksen arvot annettiin 1×10^{-5} s välein.



Kuva 20. Ensimmäiseen ehjään malliin vaikuttanut satunnaisheräte. Kuvassa a) koko kuormitushistoria ja b) näyte kuormitushistoriasta aikavälillä 0,2 - 0,3 s.

Vaurion tunnistuksessa ei käytetä tietoa rakenteeseen vaikuttavasta herätteestä, sillä herätteen mittaaminen todellisissa sovelluksissa voi olla vaikeaa.

6.2 Vaadittava aikainkrementti

Simulaation stabiilitetti Abaqus/Explicitissä vaatii riittävän pienen aikainkrementin käyttämistä laskennassa. Liian suuren aikainkrementin käyttäminen aiheuttaa mallin epästabiiliutta ja tulosten vääristymistä. Laskentaan vaadittava aika on suoraan verrannollinen käytettävän aikainkrementin pituuteen, joten on edullista käyttää mahdollisimman lähellä stabiilitettirajaa olevaa aikainkrementtiä.

Vaadittavan aikainkrementin arviointiin käytettiin luvussa 3.1.3 esitettyjä yhtälöitä.

$$\Delta t_{stable} \approx \frac{L_{min}}{c_d}, \quad (11)$$

$$c_d = \sqrt{\frac{\hat{\lambda} + 2\hat{\mu}}{\rho}}, \quad (13)$$

$$\hat{\lambda} = \lambda_0 = \frac{Ev}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (14)$$

ja

$$\hat{\mu} = \mu_0 = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (15)$$

Taulukossa 14 on esitetty vaadittavan aikainkrementin arviointiin tarvittavat arvot. Pienimpänä elementin dimensiona L_{min} käytettiin elementin paksuutta rakenteen juuressa, missä elementtejä oli kaksi kappaletta elementin paksuuden yli.

Taulukko 14. Aikainkrementin arviointiin tarvittavat arvot.

Suure	Arvo
L_{min}	1,6 mm
ρ	7850 kg/m ³
E	209 GPa
ν	0,3

Kun tunnetut arvot sijoitetaan yhtälöihin (11), (13), (14) ja (15), saadaan laskettua arvio aikainkrementille

$$\Delta t_{stable} \approx 2,673 \times 10^{-7} s.$$

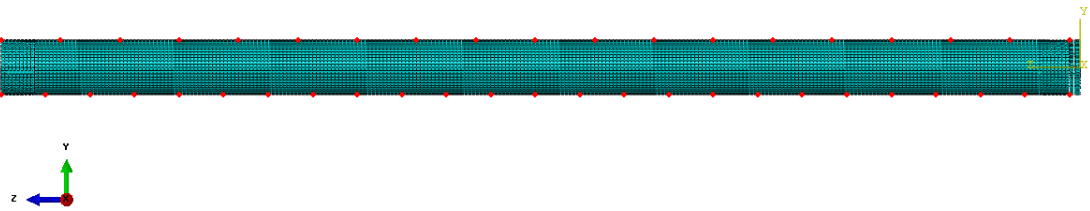
Abaquksessa on työkalu vaadittavan aikainkrementin määrittämiseen (*element-by-element time increment estimator*), joka määrittää pienimmän elementin koon perusteella vaadittavan aikainkrementin. Myös tätä työkalua käytettiin vaadittavan aikainkrementin määrittämisessä apuna. Työkalua käyttämällä saatiin aikainkrementin arvoksi $2,147 \times 10^{-7} s$.

Kun käytetään kiinteää aikainkrementtiä, täytyy valinnassa huomioida myös tulostettavien arvojen halutut ajanhetket. Tämä tarkoittaa sitä, että aikainkrementti täytyy valita siten, että haluttu näytteenottotaajuus on jaollinen valitulla aikainkrementillä, jotta arvojen tulostaminen halutuilla ajanhetkillä onnistuu.

Aikainkrementin pituuden arvioimiseen käytetty laskukaava antoi aikainkrementin pituudeksi $2,673 \times 10^{-7} s$ ja Abaquksen aikainkrementin arviointityökalu $2,147 \times 10^{-7} s$. Vaikka näiden välissä sijaitseva $2,5 \times 10^{-7} s$ sopisi näytteenottotaajuuden (0,1 ms) puolesta käytettäväksi aikainkrementiksi, saattaisi se kuitenkin aiheuttaa epästabiiliutta mallissa, joten käytettäväksi aikainkrementiksi valittiin $2,0 \times 10^{-7} s$.

6.3 Tulostettavat suureet

Työn tarkoituksena oli luoda simuloitua mittausdataa vaurion tunnistusta varten. Tätä varten sekä rakenteen ylä- että alapinnalla sijaitsevista mittaussolmuista tulostettiin simuloinnin ajalta tiettyjä suureita. Mittaussolmuja on mallissa rakenteen yläpinnalla 19 kpl ja alapinnalla 25 kpl. Mittaussolmut on sijoitettu kuvan 21 mukaisesti tasaisin välein siten, että ensimmäiset mittaussolmut ovat 20 mm:n päässä rakenteen juuresta (10 mm säröstä) ja viimeiset rakenteen vapaassa päässä.



Kuva 21. Mittaussolmut tulostettavia suureita varten (kuvassa tiheä elementtiverkko).

Tulostettavia suureita, joista ollaan kiinnostuneita, ovat pystysuuntaiset kiihtyvyydet, siirtymät, nopeudet ja pituussuuntaiset venymät. Simulaatiossa näytteenottovälinä oli 0,1 ms. Tulostettavaksi valitut suureet on esitetty taulukossa 15.

Taulukko 15. Tulostettavat suureet.

Suure/malli	Hengittävä särö (Explicit Dynamics)	Avoin särö (Modal Dynamics)
Kiihtyvyys (y-suunta)	A_2	A_2
Siirtymä (y-suunta)	U_2	U_2
Nopeus (y-suunta)	V_2	V_2
Venymä (z-suunta)	LE_{33}	E_{33}

Simulaatiosta saadun "mittaussignaalin" käsittelyssä tulee tiedostaa, että saatu signaali *saattaa* olla vääristynyt signaalin laskostumisen takia, koska korkeimmat mallissa esiintyvät taajuuudet eivät ole tiedossa.

Nyquistin teoreeman mukaan näytteenottotaajuuden f_s tulisi olla vähintään kaksinkertainen suurimpaan signaalissa esiintyvään taajuuskomponenttiin f_{max} verrattuna. Muutoin näytteistettävästä signaalista Nyquistin taajuutta $f_s/2$ suuremmat taajuuudet laskostuvat pienempien taajuuksien päälle vääristäen mittausdataa. [12, s. 3–5; 13, s. 13–19.]

Tässä tapauksessa kuitenkin riittää, että näytteenottotaajuus on "riittävän" suuri, sillä testattava vaurion tunnistus algoritmi perustuu muutosten havaitsemiseen. Ei ole siis välttämätöntä, että mittauksien tulokset signaalista ovat täysin vääristymättömiä, kunhan muutokset näkyvät myös vääristyneessä signaalissa.

7 Tulokset

Tämän insinöörityön lopputuotteena syntyi simuloitua mittausdataa ehjästä ja vaurioituneesta rakenteesta sekä hengittävällä säröllä että avoimella säröllä. Simuloitua mittausdataa käytettiin jo olemassa olevan vaurion tunnistus algoritmin testaamiseen [14].

Vaikka vaurion tunnistus ja mittausdatan analysointi ei ole osa tätä insinöörityötä, on analysoinnista saatuja tuloksia esitetty myös tässä luvussa. Mittausdatan analysoinnista vastasi työn ohjaaja yliopettaja Jyrki Kullaa.

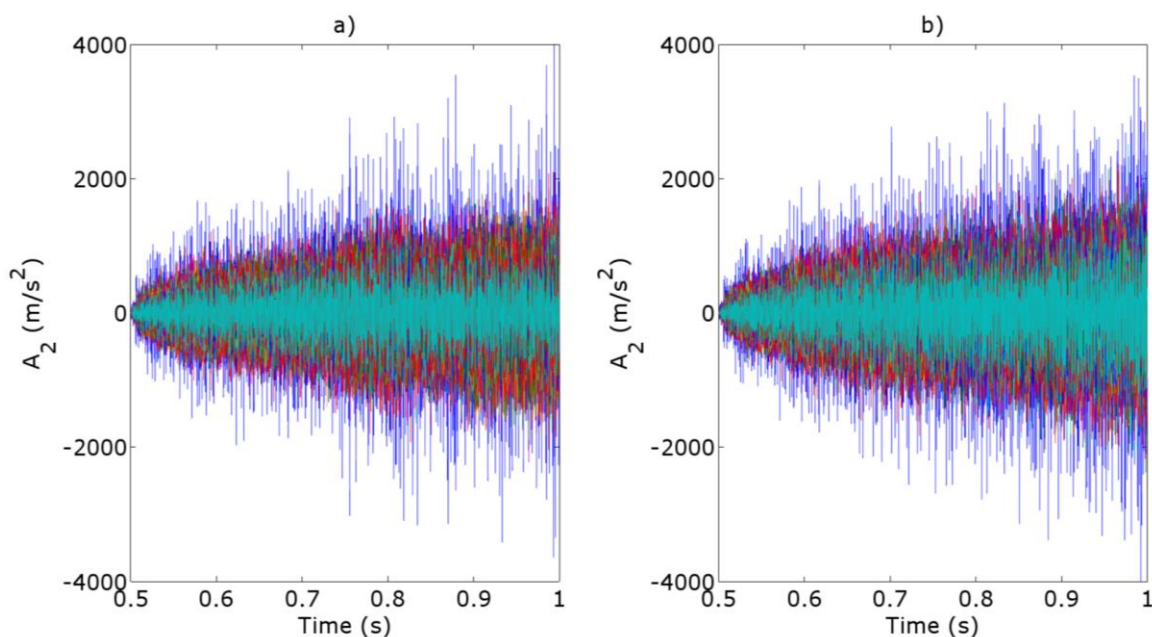
7.1 Simuloinnin tulokset

Simuloinnin tuloksena saatiin simuloitua mittausdataa määritetyistä mittaussolmuista sekä rakenteen ylä- (19 kpl) että alapinnalta (25 kpl). Kaikista simuloituista malleista kerättiin mittaussolmuista kiihtyvyydet, venymät, siirtymät ja nopeudet. Tämän lisäksi avoimen särön Modal Dynamics -malleista tulostettiin rakenteen ominaistaajuuudet kaikilla säröillä 8500 Hz:iin asti.

Vertaamalla ehjistä malleista saatuja tuloksia Abaqus Explicit - ja Modal Dynamics -simulaatioiden välillä, saadaan suuntaa antava käsitys mallien tulosten luotettavuudesta

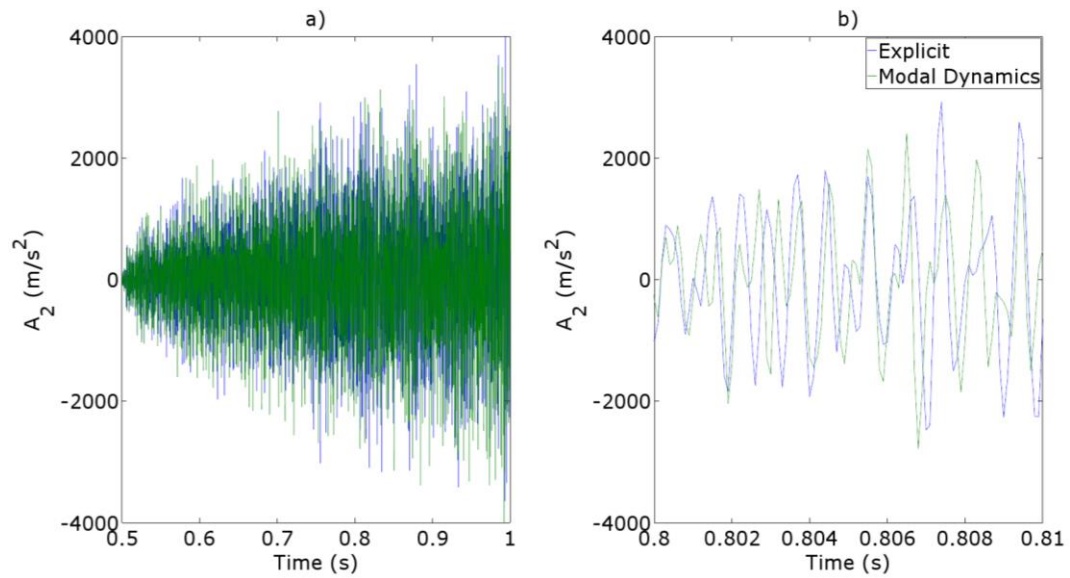
ja niiden vertailukelpoisuudesta. Vertailuun käytettiin sekä kiihtyvyyss- että siirtymädataa ehjän rakenteen alapinnan mittaussolmuista.

Kuvassa 22 on esitetty y-suuntaiset kiihtyvyydet kaikista rakenteen alapinnan mittaussolmuista sekä Explicit- että Modal Dynamics -mallilla. Kuvaajista nähdään, että molemmilla malleilla kiihtyvyydet ovat samaa suuruusluokkaa.



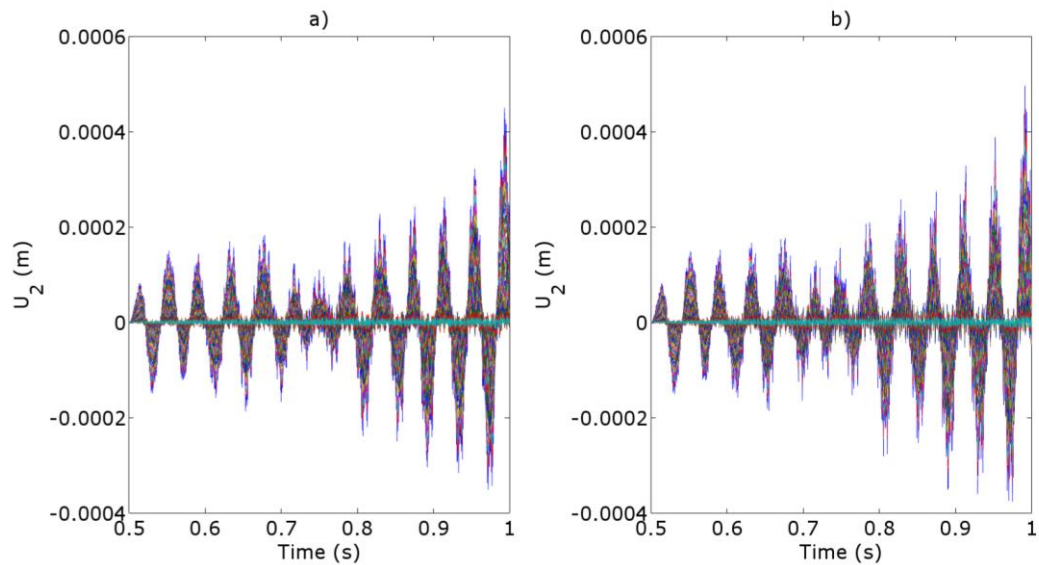
Kuva 22. Kiihtyvyyssdata rakenteen alapinnan mittaussolmuista a) Explicit-mallista ja b) Modal Dynamics-mallista.

Kuvassa 23 on esitetty rakenteen vapaan pään alareunan mittaussolmun (solmu 11) kiihtyvyydet koko simuloinnin ajalta molemmilta malleilta sekä kiihtyvyydet ajalta 0,8 – 0,81 s. Kuvasta nähdään kiihtyvyyksien kuvaajien olevan hyvin samankaltaisia sen lisäksi, että kiihtyvyyksien suuruusluokka on sama.



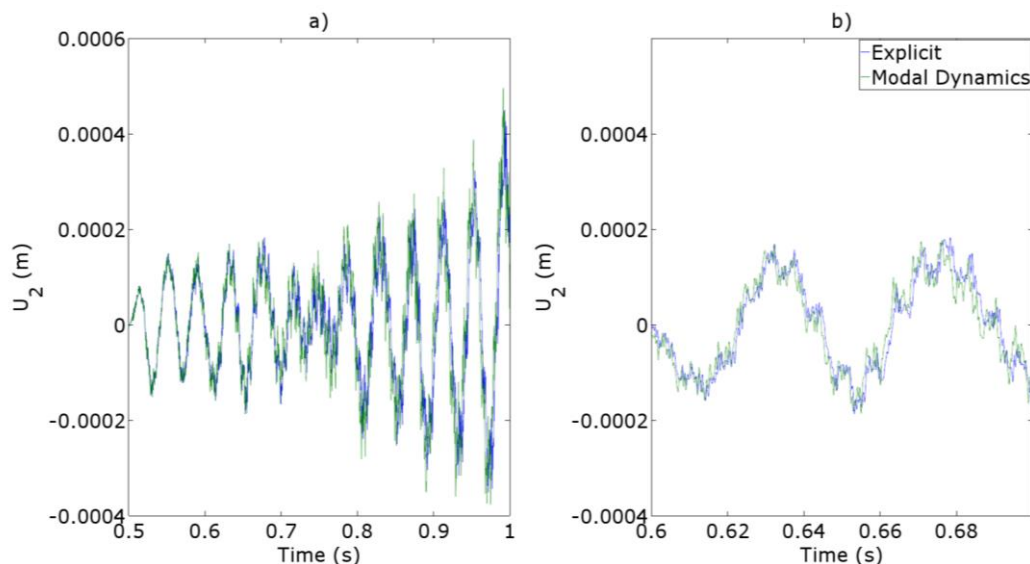
Kuva 23. Kiihtyvyydata rakenteen vapaan pään alareunan mittaussolmusta (solmu 11). Kuvassa kiihtyvyydet a) koko simuloinnin ajalta ja b) aikavälillä 0,8 – 0,81 s.

Myös siirtymiä verrattaessa nähdään, että tulokset mittaussolmuissa ovat sekä suuruusluokaltaan että muutenkin silmämääräisesti tarkasteltuna yhtenevät kuten kuvasta 24 nähdään.



Kuva 24. Siirtymädata rakenteen alapinnan mittaussolmuista a) Explicit-mallista ja b) Modal Dynamics-mallista.

Kuvassa 25 on esitetty vielä rakenteen vapaan pään alareunan mittaussolmun (solmu 11) siirtymät koko simuloinnin ajalta ja aikaväliltä 0,6 – 0,7 s. Kuvasta 25 nähdään, että samoin kuin kiihtyvyyksien, niin myös siirtymien kuvaajat ovat hyvin samankaltaiset.



Kuva 25. Siirtymät rakenteen vapaan pään alareunan mittaussolmusta (solmu 11). Kuvassa kiihtyvyydet a) koko simuloinnin ajalta ja b) aikavälillä 0,6 – 0,7 s.

Molemmilla analyysimenetelmillä saatiin ehjistä malleista toisiaan vastaavia tuloksia sekä kiihtyvyyksien että siirtymien suhteen. Näiden vertailujen perusteella voidaan todeta, että mallit tuottavat halutunlaisia tuloksia. Tuloksissa täytyy kuitenkin huomioida, että simuloituissa malleissa ei ole käytetty vaimennusta lukuun ottamatta Abaqus Explicitissä oletuksena olevaa *Bulk viscosity* -vaimennusta tämän oletusarvoilla. Vaimennuksen puute saattaa olla myös syynä kiihtyvyyksien kasvamiseen simuloinnin aikana.

Avoimen särön Modal Dynamics -malleista poimitut viisi ensimmäistä poikittaista ominaistajuuksia erikokoisille säröille on esitetty taulukossa 16.

Taulukko 16. Viisi ensimmäistä poikittaista ominaistajuutta malleista joissa avoin särö.

Muoto	Särön koko (%)				
	0 %	7,7 %	13,5 %	25,0 %	50,0 %
n	f_n	f_n	f_n	f_n	f_n
1	24,917	24,811	24,588	23,617	17,785
2	152,51	151,92	150,71	145,83	126,1
3	412,43	411,03	408,18	397,26	360,73
4	771,9	769,71	765,4	751,14	723,64
5	1210,2	1207,2	1200,8	1179,9	1133,6

Taulukossa 17 on esitetty erikokoisten säröjen ominaistajuuksien prosentuaalinen ero ehjään malliin verrattuna.

Taulukko 17. Erikokoisten säröjen prosentuaalinen ero ehjään malliin verrattuna.

Muoto	Särön koko (%)				
	0 %	7,7 %	13,5 %	25,0 %	50,0 %
n	f_n	%-ero	%-ero	%-ero	%-ero
1	24,917	-0,43 %	-1,33 %	-5,36 %	-33,40 %
2	152,51	-0,39 %	-1,19 %	-4,48 %	-18,96 %
3	412,43	-0,34 %	-1,04 %	-3,75 %	-13,37 %
4	771,9	-0,28 %	-0,85 %	-2,73 %	-6,45 %
5	1210,2	-0,25 %	-0,78 %	-2,54 %	-6,54 %

Taulukosta 17 nähdään, että vaikka ominaistajuudet voidaan mitata suhteellisen tarkasti, voi pienimpien säröjen havaitseminen olla vaikeaa pelkästään ominaistajuuksien muutosten perusteella.

7.2 Vaurion tunnistuksen tulokset

Vaurion tunnistuksessa opetusdatana, johon muita malleja verrattiin, käytettiin ensimmäistä analyysiä ehjästä mallista. Simuloituun mittausdataan on lisätty kohinaa siten, että analysoitavan signaalin signaali-kohinasuhde (SNR) on keskimäärin 30 dB.

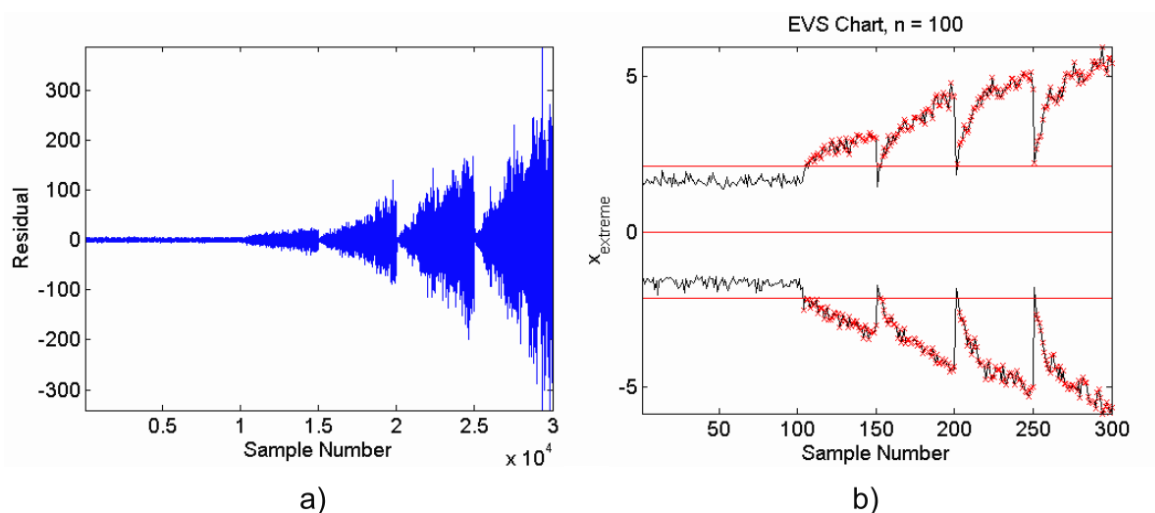
Vaurion tunnistuksen tuloksista saatiin kuvaajina EVS-valvontakortti (Extreme Value Statistics) ja residuaalin ensimmäinen pääkomponentti (PC - Principal Component). EVS-valvontakortissa otoskokona on 100 ($n=100$).

Analyseissä näytteet 1 – 5000 ovat opetusdataa ensimmäisestä ehjästä mallista. Tähän opetusdataan verrataan muita simuloituja malleja:

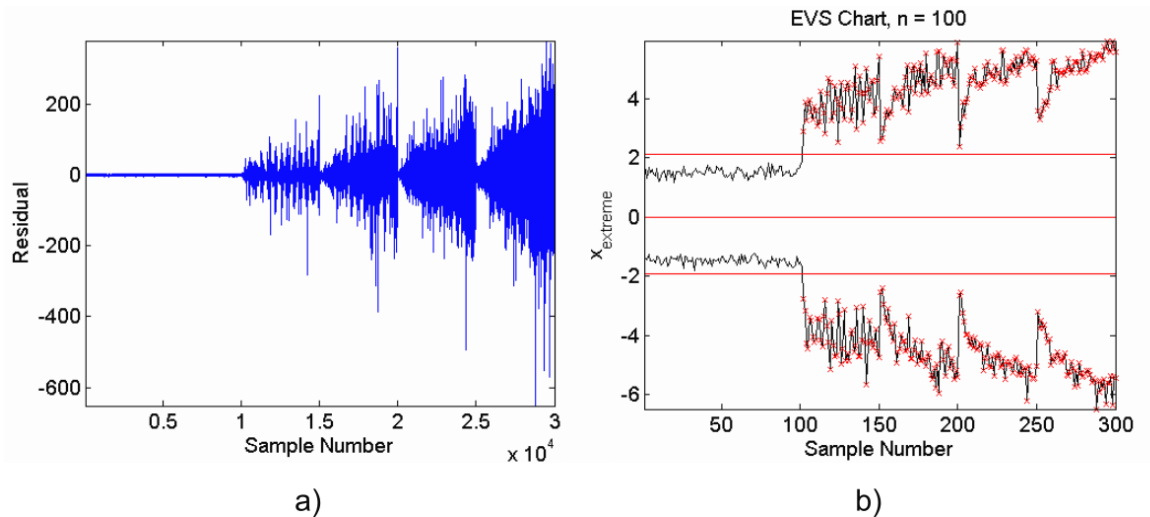
- Näytteet 5001 – 10000 - toinen ehjä malli
- 10001 – 15000 - 7,7 % särö
- 15001 – 20000 - 13,5 % särö
- 20001 – 25000 - 25 % särö
- 25001 – 30000 - 50 % särö.

Hengittävä särö

Vaurion tunnistuksen tulokset kiihtyvyyssdatasta rakenteen alapinnan mittaussolmuista (25 kpl) on esitetty kuvassa 26 ja rakenteen yläpinnan mittaussolmuista (19 kpl) kuvassa 27.



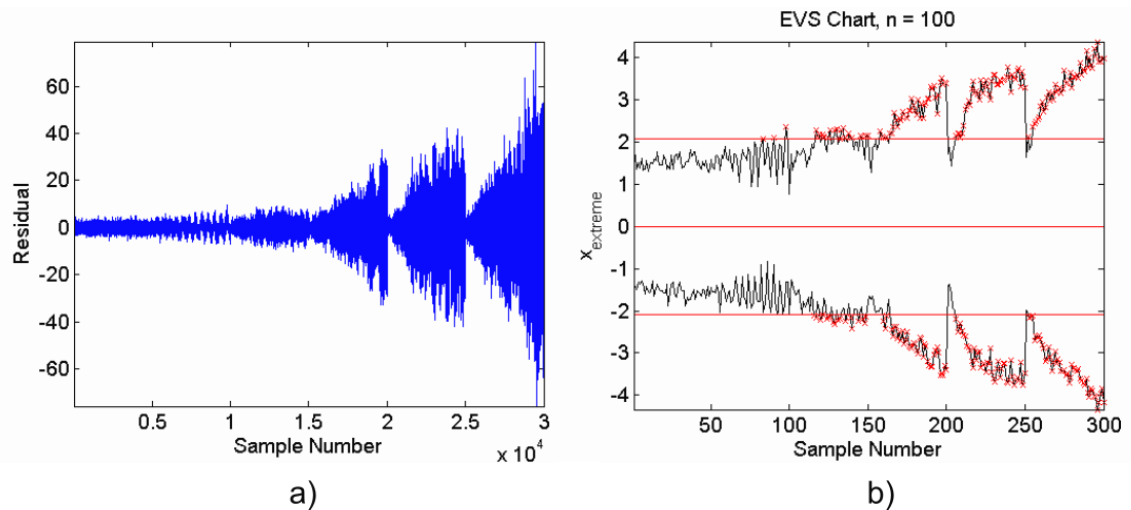
Kuva 26. Vaurion tunnistuksen tulokset rakenteen alapinnan mittaussolmujen (25 kpl) kiihtyvyyssdataa perusteella. a) Residuaalin ensimmäinen pääkomponentti ja b) EVS-valvontakortti.



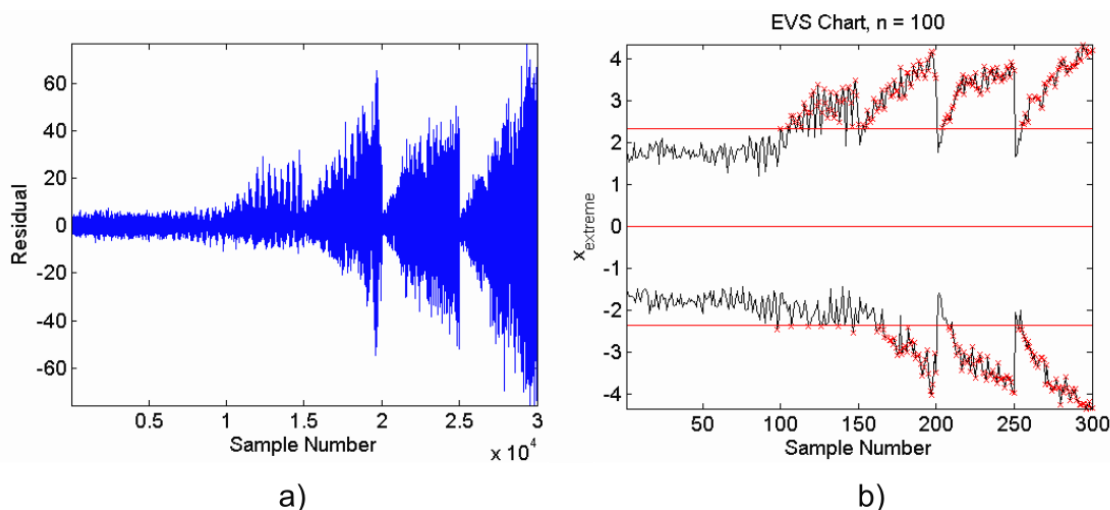
Kuva 27. Vauriontunnistuksen tulokset rakenteen yläpinnan mittaussolmujen (19 kpl) kiihtyvyyss-
datan perusteella. a) Residuaalin ensimmäinen pääkomponentti ja b) EVS-valvontakortti.

Vauriontunnistuksessa havaittiin kaikki säröt sekä rakenteen ylä- että alapinnan mittaussolmujen kiihtyvyyssdatasta.

Vauriontunnistus suoritettiin myös samoista mittaussolmuista venymädatan perusteella. Vauriontunnistuksen tulokset venymien perusteella on esitetty rakenteen alapinnan mittaussolmuista kuvassa 28 ja yläpinnan mittaussolmuista kuvassa 29.



Kuva 28. Vauriontunnistuksen tulokset rakenteen alapinnan mittaussolmujen (25 kpl) venymäda-
tan perusteella. a) Residuaalin ensimmäinen pääkomponentti ja b) EVS-valvontakortti.

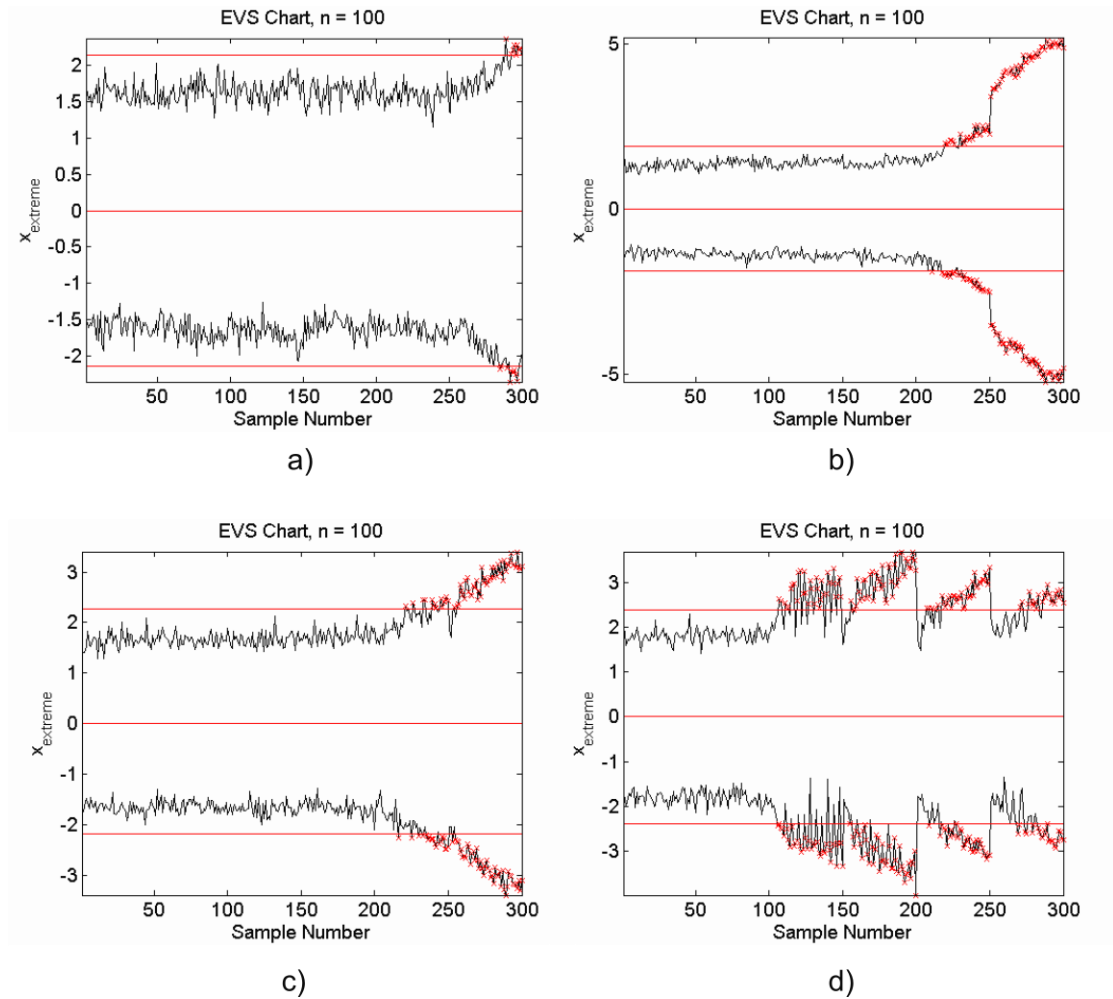


Kuva 29. Vauriontunnistuksen tulokset rakenteen yläpinnan mittaussolmujen (19 kpl) venymädatan perusteella. a) Residuaalin ensimmäinen pääkomponentti ja b) EVS-valvontakortti.

Myös venymiin perustuvassa vauriontunnistuksessa havaittiin kaikki säröt sekä rakenteen ylä- että alapinnan mittaussolmujen venymädatasta, vaikkakaan pienintä (7,7 %) säröä ei havaittu aivan yhtä hyvin kuin kiihtyvyyksien perusteella.

Avoim särö

Avoimen särön vauriontunnistuksen tulokset on esitetty kuvassa 30. Avoimen särön osalta tulostettiin vain EVS-valvontakortit. Vauriontunnistukseen käytettiin kiihtyvyyks- ja venymädataa rakenteen ala- (25 kpl) ja yläpinnan (19 kpl) mittaussolmuista.



Kuva 30. Vauriontunnistuksen EVS-valvontakortit avoimilla säröillä. Vauriontunnistuksen perusteena a) kiihtyvyydet alapinnan mittaussolmuista, b) kiihtyvyydet yläpinnan mittaussolmuista, c) venymät alapinnan mittaussolmuista ja d) venymät yläpinnan mittaussolmuista.

Rakenteen yläpinnan mittaussolmujen venymien perusteella havaittiin kaikki säröt. Kuitenkin, mikäli lähimpänä säröä oleva mittaussolmu poistetaan analyysistä, ei säröjä havaita ollenkaan. Myös 50 % ja 25 % säröt havaittiin rakenteen yläpinnan mittaussolmujen kiihtyvyyksien sekä rakenteen alapinnan mittaussolmujen venymien perusteella.

Yhteenveto vauriontunnistuksesta

Vauriontunnistuksessa havaitut säröt on esitetty taulukossa 18.

Taulukko 18. Vauriontunnistuksessa havaitut säröt.

Hengittävä särö		Särön koko (%)			
		7,7 %	13,5 %	25,0 %	50,0 %
Kiihtyvyydet	Alapinta	OK	OK	OK	OK
	Yläpinta	OK	OK	OK	OK
Venymät	Alapinta	OK	OK	OK	OK
	Yläpinta	OK	OK	OK	OK

Avoin särö		Särön koko (%)			
		7,7 %	13,5 %	25,0 %	50,0 %
Kiihtyvyydet	Alapinta				
	Yläpinta			OK	OK
Venymät	Alapinta			OK	OK
	Yläpinta	OK *	OK *	OK *	OK *

OK - Havaittu särö.
 * Ei havaittu ilman lähimpänä säröä olevaa mittaussolmua.

8 Yhteenveto

Insinööriyössä tutkittiin väsymissärön havaitsemista käyttämällä simuloitua mittaustaata, joka on saatu elementtimenetelmällä mallinnetusta rakenteesta. Analysoitavaksi rakenteeksi valittiin ulokepalkki pyöreällä putkiprofiililla ja tutkittavaksi vauriotyyppiksi hengittävä särö. Rakenne mallinnettiin tulosten vertailun vuoksi myös käyttämällä avoimia säröjä. Simuloinneissa rakenteen vapaaseen päähän vaikutti satunnaisheräte. Simuloinneista saatiin vauriontunnistusta varten kiihtyvyyden- ja venymädataa rakenteen ylä- ja alapinnoilla sijaitsevista mittaussolmuista. Kiihtyvyyden- ja venymädatan perusteella selvitetiin, minkä kokoinen särö voidaan havaita.

Hengittävän särön osalta pystyttiin havaitsemaan sekä kiihtyvyyksien että venymien perusteella kaikki mallinnetut säröt niin rakenteen ala- kuin yläpinnan mittaussolmujen perusteella. Avoimen särön osalta yläpinnan venymien perusteella havaittiin kaikki säröt, mutta kun analyysistä jätettiin pois lähimpänä säröä oleva mittaussolmu, ei enää havaittu

minkään kokoisia säröjä. Yläpinnan kiihtyvyyksien ja alapinnan venymien perusteella havaittiin kuitenkin suurin ja toiseksi suurin avoin särö (50 % ja 25 %). Vauriontunnistuksessa havaitut säröt on esitetty luvun 7 lopusta löytyvässä taulukossa 18.

Vauriontunnistus onnistui erityisen hyvin hengittäville säröille. Erityisesti rakenteen yläpinnan mittaussolmujen kiihtyvyys- ja venymädatan analysoinnissa residuaalin ensimmäisessä pääkomponentissa näkyi selkeitä piikkejä, jotka saattavat johtua kontaktin iskumaisesta sulkeutumisesta. Avoimen särön osalta vauriontunnistus on kuitenkin huomattavasti vaikeampaa, kuten tuloksistakin nähdään. Avoimella säröllä rakenne käyttäytyy lineaarisesti ehjän rakenteen tapaan. Särön onkin oltava riittävän suuri, jotta rakenteen ominaisuudet muuttuvat tarpeeksi vaurion havaitsemiseksi.

Insinööriyön tuloksena saatiin tehtyä toimivat mallit työssä käytetyn ulokepalkkirakenteen simuloimiseen ja vauriot, joita lähdettiin ensisijaisesti havaitsemaan, myös havaittiin. Tämän perusteella insinööriyölle asetettuja tavoitteita voidaan pitää täyttyneinä.

Malleissa on kuitenkin vielä simuloinnin realistisuuden kannalta parannettavaa. Esimerkiksi vaimennuksella on erittäin todennäköisesti vaikutusta rakenteen käyttäytymiseen vauriontunnistuksen kannalta merkittävällä tavalla. Myös kontaktin "pehmentäminen" ja kitkan huomioiminen saattaisivat parantaa mallinnuksen realismia. Nykyisessä mallissa käytetty "kova kontakti" (hard contact) ei salli ollenkaan pintojen tunkeumaa toisiinsa mikä saattaa johtaa todellisuutta kovempaan kontaktiin.

Särön, sekä hengittävän että avoimen, vaikutusta rakenteen käyttäytymiseen ja vauriontunnistukseen täytyy tutkia myös kokeellisesti, sillä kuten aiemmin mainittu, ei käytetty kontaktimalli välttämättä vastaa todellista tilannetta. Sen lisäksi, että kokeellisista testeistä saadaan tuloksia todellisista tilanteista, voidaan saatuja tuloksia käyttää myös simuloitujen mallien kehittämiseen kun tiedetään enemmän rakenteen käyttäytymisestä.

Lähteet

- 1 Farrar, C. R. & Worden, K. 2006. An introduction to structural health monitoring. Proc. R. Soc. A 2007 365, 303-315; DOI:10.1098/rsta.2006.1928.
- 2 Vanlanduit, S., Verboven, P. & Guillaume, P. 2002. On-line Detection of Fatigue Cracks Using An Automatic Mode Tracking Technique. First European Workshop on Structural Health Monitoring (SHM 2002). Lancaster, Pennsylvania. DEStech Publications.
- 3 Worden, K. & Dulieu-Barton J.M. 2004. An Overview of Intelligent Fault Detection in Systems and Structures. Structural Health Monitoring 2004; 3; 85; DOI: 10.1177/1475921704041866.
- 4 Worden, K., Farrar C. R., Manson, G. & Park, G. 2007. The fundamental axioms of structural health monitoring. Proc. R. Soc. A 2007 463 1639-1664; DOI: 10.1098/rspa.2007.1834.
- 5 Karhunen, J., Lassila, V., Pyy, S., Ranta, A., Räsänen, S., Saikkonen, M. & Suosara, E. 2006. Lujuusoppi. Helsinki. Otatieto.
- 6 Dassault Systèmes. 2014. Abaqus 6.14 Online Documentation: Abaqus Analysis User's Guide.
- 7 Dassault Systèmes. 2014. Abaqus 6.14 Online Documentation: Getting Started with Abaqus: Interactive Edition.
- 8 Cook, R. D., Malkus, D. S. & Plesha, M. E. 1989. Concepts and Applications of Finite Element Analysis 3rd edition. Wiley.
- 9 Dassault Systèmes. 2014. Abaqus 6.14 Online Documentation: Abaqus/CAE User's Guide.
- 10 Ruukki rakenneputkivalikoima. Verkkodokumentti. <http://www.ruukki.fi/Teras/Rakenneputket>. Luettu 9.9.2015.
- 11 Young, W. & Budynas, Richard. G. 2002. Roark's Formulas for Stress & Strain 7th edition. Singapore. McGraw-Hill.
- 12 Huttunen, H. 2014. Signaalinkäsittelyn perusteet. Tampereen teknillinen yliopisto. Signaalinkäsittelyn laitos. Opetusmoniste 2014:1. Verkkodokumentti. <<http://www.cs.tut.fi/kurssit/SGN-11000/SGN-11000.pdf>>. Luettu 14.1.2016.

- 13 Tan, L. 2008. Digital Signal Processing Fundamentals and Applications. Elsevier.
- 14 Kullaa, J., Santaoja, K. & Eymery, A. 2013. Vibration-based structural health monitoring of a simulated beam with a breathing crack. Key Engineering Materials Vols. 569–570, Damage Assessment of Structures X. Trans Tech Publications, Switzerland, 1093–1100.

Abaqus/Explicit: Mallin energiakomponentit

Tämän liitteen taulukossa 1 on esitetty loput energiakomponentit, joita ei esitelty varsinaisessa työssä, mutta jotka kuitenkin esiintyivät energiatasapainon yhtälöissä.

Taulukko 1. Energiatasapainon yhtälössä esiintyvät energiakomponentit [7, 9.6].

Variable Name	Energy Quantity
ALLIE	Internal energy, E_I : $ALLIE = ALLSE + ALLPD + ALLCD + ALLAE + ALLDMD + ALLDC + ALLFC$.
ALLKE	Kinetic energy, E_{KE} .
ALLVD	Viscous dissipated energy, E_V .
ALLFD	Frictional dissipated energy, E_{FD} .
ALLCD	Energy dissipated by viscoelasticity, E_{CD} .
ALLWK	Work of the external forces, E_W .
ALLPW	Work done by contact penalties, E_{PW} .
ALLCW	Work done by constraint penalties, E_{CW} .
ALLMW	Work done by propelling added mass (due to mass scaling), E_{MW} .
ALLSE	Elastic strain energy, E_E .
ALLPD	Inelastic dissipated energy, E_P .
ALLAE	Artificial strain energy, E_A .
ALLIHE	Internal heat energy, E_{IHE} .
ALLHF	External heat energy through external fluxes, E_{HF} .
ALLDMD	Energy dissipated by damage, E_{DMD} .
ALLDC	Energy dissipated by distortion control, E_{DC} .
ALLFC	Fluid cavity energy (negative of work done by fluid cavities), E_{FC} .
ETOTAL	Energy balance: $E_{TOT} = E_I + E_V + E_{FD} + E_{KE} + E_{IHE} - E_W - E_{PW} - E_{CW} - E_{MW} - E_{HF}$.

Työohje - Simuloitavan rakenteen mallinnus ja simulointi (Abaqus/Explicit)

Tässä liitteessä käydään vaihe vaiheelta läpi rakenteen mallinnus ja analyysin määrittely.

Geometrian mallintaminen

Luodaan rakenteen osat.

1. Create Part - Nimeä esim. Osa 1
 - a. Asetukset: 3D - Deformable - Solid - Extrusion
 - b. Approximate size - 2 (m)
 - c. Continue
2. Piirrä ja mitoit haluttu profiili
3. Done
4. Valitse pursotuksen syvyys (10e-3 m)

Tehdään osasta kaksi kopioita ja nimetään ne Osa 2 ja Osa 3, sekä muutetaan Osa 3 pursotuksen syvyydeksi 1980 e-3 (m).

- Model Tree - Osa 3 - Features - Solid extrude - Edit - Aseta 1.980 - OK

Materiaalitiedot

Materials - Create

1. Nimeä - esim. Teräs
2. General - Density - 7850 (kg/m³)
3. Mechanical - Elastic
 - Isotropic
 - Young's Modulus - 209e9 (Pa)
 - Poisson's Ratio - 0.3
4. OK
5. Luodaan Section - ja asetetaan materiaaliksi luotu materiaali (Teräs)
6. Liitetään luodut ominaisuudet mallin osiin. (Parts - Osa X - Section Assignments
- Valitaan osa - Done - (Valitaan oikea Sectio) - OK)

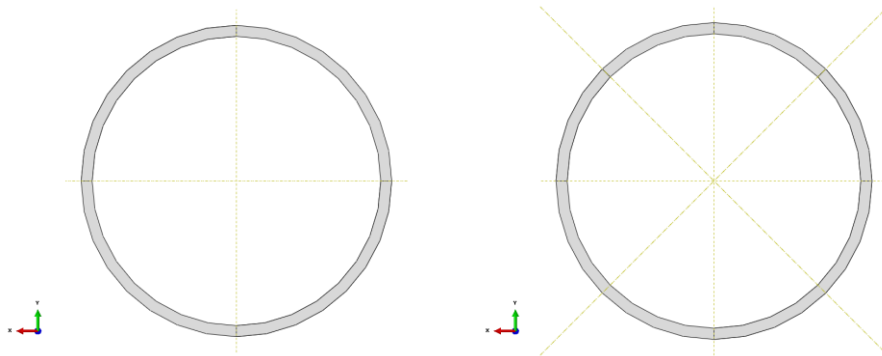
Kokoonpanon luonti

Tuodaan luodut osat kokoonpanoon

1. Assembly - Instances. Instance Type: Dependent (mesh on part)
2. Asetetaan osat kokoonpanoksi käyttämällä Instance ja Constraint työkaluja.

Osien partitiointi

Mallinnetut osat partitioidaan part-moduulissa elementtiverkon ja särön luontia varten. Ehjän mallin rakenne jaetaan symmetrisesti neljään osaan. Särömalleissa luodaan tämän lisäksi partitiot siten, että partition raja menee särörajaa pitkin (kuva 1). Partitiointiin käytettiin apuna perustasoja (datum planes).



Kuva 1. Rakenteen partitiointi. Vasemmalla olevaa jakoa käytetty ehjälle mallille ja Osalle 3 kaikissa malleissa. Oikealla olevaa jakoa käytetty osille 1 & 2 25 %:n särömallissa.

Elementtiverkon luonti

Luodaan osille elementtiverkot Mesh-moduulissa.

1. Valitaan verkotettava osa

- Mesh - Controls - Done - Hex - Structured

2. Valitaan osa johon elementtityyppi liitetään

- Mesh - Element type - Valitaan C3D8I elementti (Incompatible modes) - OK

3. Määritetään elementtiverkon tiheys (Osat 1 & 2)

- Seed - Edges - Valitaan rakenteen pituussuuntainen reuna - asetetaan elementtien määräksi 5.

- Seed - Edges - Valitaan reunat rakenteen kehältä - asetetaan elementtien määräksi 26 elementtiä / neljännes.
- Seed - Edges - Valitaan reuna rakenteen paksuuden yli - asetetaan elementtien määräksi 2 elementtiä.

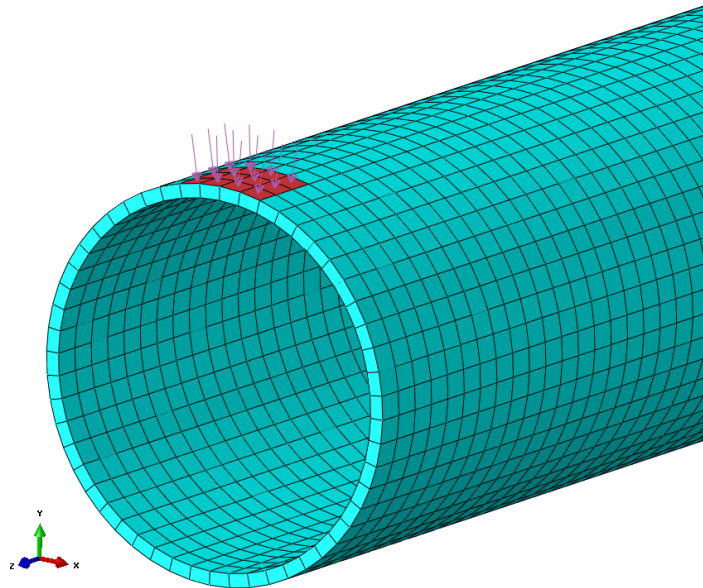
4. Määritetään elementtiverkon tiheys (Osa 3)

- Seed - Edges - Valitaan rakenteen pituussuuntainen reuna - asetetaan elementtien määräksi 288.
- Seed - Edges - Valitaan reunat rakenteen kehältä - asetetaan elementtien määräksi 13 elementtiä / neljännes.
- Seed - Edges - Valitaan reuna rakenteen paksuuden yli - asetetaan elementtien määräksi 1 elementti.

Luodaan kaikille osille elementtiverkot (Mesh - Part - Yes).

Surfaces & Sets

1. Luodaan mallille kontakti- ja kiinnityspinnat Assembly-moduulin Surfaces-valikosta.
2. Luodaan mittaussolmut (mittausanturit) kiihtyvyyksiä, siirtymiä ja nopeuksia varten sekä ylä- että alapinnalle luomalla molemmille omat Node Setit joihin valitaan halutut solmut. (Tools - Set - Create - Node)
3. Luodaan mittauselementit venymien mittaamiseen. Valitaan mittaussolmuja ympäröivät elementit. (Tools - Set - Create - Element)
4. Luodaan elementit (kuva 2) joihin heräte vaikuttaa (Surface - Create - Mesh - valitaan 4 x 3 elementtiä rakenteen vapaan pään yläpinnalla).



Kuva 2. Herätteen vaikutuselementit rakenteen vapaassa päässä.

Analyysin määrittely (Step)

Luodaan analyysiaskel kontaktin luontia varten. (Steps- Create - Name: Kontakti - After Initial - Dynamic, Explicit- Continue.)

- Time period: 0.5
- Incrementation - Fixed - User defined time increment = 0.001
- OK

Luodaan varsinainen analyysiaskel (Steps- Create - Name: Analyysi - After Kontakti - Dynamic, Explicit - Continue)

- Time period: 0.5
- Incrementation - Fixed - User defined time increment = 2E-007
- OK

Kontaktin luonti (malleille joissa särö)

1. Interaction Properties - Create

- a. Name: Kontakti - Type: Contact
- b. Mechanical - Tangential Behavior:
 - Friction formulation: Frictionless
- c. Mechanical - Normal Behavior:
 - Pressure-Overclosure: "Hard" Contact
 - Constraint enforcement method: Default
 - Allow separation after contact (Valittu)
- d. OK

2. Interactions - Create

- a. Name: Kontakti, Step: Kontakti
- b. Type: General contact (Explicit)
- c. Valitaan kontaktipinnat (Selected surface pairs)
- d. Global property assignment: Kontakti

Tie constraint

Pinnat joilla ei ole säröä sidotaan toisiinsa kiinni käyttämällä tie-constraint -sidosyhtälöä.

1. Constraints - Tie
2. Valitaan Master-surface (jos toisessa pinnassa on harvempi elementti-verkko, silloin se toimii master-surfacena) - Done
3. Valitaan Slave-surface - Done
4. Discretization method: Analysis Default
5. OK

Laskettavat tulokset

Tulosten laskemista varten luodaan Field output Requestit yläpuolen mittaussolmuille, alapuolen mittaussolmuille ja venymien mittausta varten määritetyille elementeille.

- Field Output Requests - Create
- Name: Anturit_ala/ Anturit_yla/ Anturit_E - Step: Analyysi
- Domain: Set - mittaussolmut ala / mittaussolmut ylä / mittauselementit
- Frequency: Every x units of time x: 0.0001
- Timing: Output at approximate times
- Output Variables: A, LE, U, V, (mittauselementeille pelkästään LE)

Visualisointia varten voidaan luoda vielä Field Output Request esimerkiksi siirtymistä ja jännityksistä koko rakenteesta esimerkiksi 0.001 s välein.

Reunaehdot ja kuormitus

- Reunaehdot - BCs - Create
 - Kontaktin luontia varten vain kontakti-askeleelle: Koko rakenteen kaikki vapausasteet kiinnitetty.
 - Analyysiä varten jäykkä kiinnitys kaikille askelille: Kiinnitetyt vapausasteet rakenteen kiinnitetyssä päässä: U1 U2 U3.
- Kuormitusamplitudin luonti (Create Amplitude - Smooth step - Liitetään kuormitushistoria - OK)
- Kuormituksen luonti (Create Load)
 - Name: Load001
 - Step: Analyysi
 - Mechanical
 - Pressure
 - Valitaan voiman vaikutuspinta
 - Done
 - Distribution: Total Force
 - Magnitude: 100
 - Amplitude: Luotu kuormitusamplitudi
 - OK

Työmääräyksen luonti ja lähetys ratkaisijalle

Jobs - Create job - Nimeä työ - Valitse malli - Continue

- Precision
 - Abaqus/Explicit precision: Double - analysis + packager
 - Nodal output precision: Full

Lähetetään työmääräys ratkaisijalle (Jobs - valitaan työ - Submit)